PETROLEUM RESEARCH

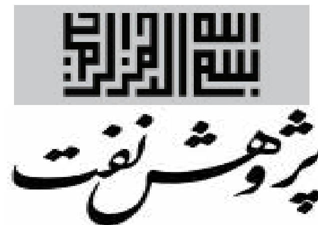
Volume 33 \ Serial Number 128 \ ISSN 2345-2900

2023(April-May)

پژوهش نفت

دوماهنامه علمی-پژوهشی/سال سی و سوم/شماره مسلسل ۱۲۸ فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲

دوماهنامه علمی-پژوهشی، سال سی و سوم، شماره مسلسل ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲





دوماهنامه علمی- پژوهشی

سال سی و سوم، شماره ۱۲۸

فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲

صاحب امتیاز: پژوهشگاه صنعت نفت
مدیر مسئول: عظیم کلانتری اصل
سردبیر: محمدرضا احسانی
مدیر اجرایی: طیبه مرادیان
ویراستار: فرهاد رحمانی چیانه
صفحه‌آرایی: نفیسه دلدار و پری‌ناز نوری
چاپ، لیتوگرافی و صحافی: چاپ گنجینه مینیاتور

آدرس:
تهران، بلوار غربی مجموعه ورزشی آزادی، پژوهشگاه صنعت نفت، دفتر مجله پژوهش نفت
صندوق پستی: ۱۴۶۶۵-۱۳۷
تلفن: ۴۸۲۵۲۱۲۹ و ۴۸۲۵۳۲۶۳ نمابر: ۴۴۷۳۹۷۱۲

وبگاه اینترنتی http://journals.ripi.ir

شماره پروانه انتشار: ۱۰۲/۷۹۹۲
ISSN ۲۳۴۵-۲۹۰۰

•مجله پژوهش نفت در پایگاه‌های زیر نمایه می‌شود:
•پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)، (www.isc.gov.ir)
•اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (www.sid.ir)
•بانک اطلاعات نشریات کشور (www.magiran.com)
• DOAJ: (www.doaj.org/)
•Chemical Abstracts Service (CAS): (www.cas.org)
•Indexcopernicus: (www. indexcopernicus.com)
•WorldCat: (www.worldcat.org)
•Leibniz Information Centre for Science and Technology (TIB): (www.tib.eu)

پژوهش نفت
دوماهنامه علمی- پژوهشی
سال سی و سوم، شماره ۱۲۸
فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲

فهرست عناوین

ارائه رویکـردی جدید در طراحی جداسـازهای افقـی گاز-مایع

مهدی فدائی، محمدجواد عامری*، یوسف رفیعی و محمدرضا حسین‌زاده
دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده

جداسازهای سطحی نقش بسیار مهمی در میادین تولیدکننده نفت و گاز ایفا می‌کنند. به همین دلیل، طراحی بهینه آنها برای کاربردهای میدانی بسیار اهمیت دارد. طراحی نیمه‌تجربی، روشی ابتدایی برای تعیین ابعاد جداسازها است. به‌دلیل فرضیات ساده‌کننده که در روش‌های طراحی نیمه‌تجربی استفاده می‌شود، تنها برای برآورد تقریبی از ابعاد جداسازها استفاده می‌شوند. واحد آزمایشگاهی جداساز دوفازی متشکل از یک جداساز افقی دوفازی در مقیاس آزمایشگاهی، پمپ‌ها، کمپرسورها و یک مخلوط‌کننده استاتیک برای ایجاد جریان دوفازی و یک فیلتر مایع برای گیرانداختن قطرات مایع از جریان گاز خروجی است. با استفاده از وزن‌کردن قطره‌های مایع‌گیر انداخته‌شده راندمان جداسازی و با استفاده از تصویربرداری، حداکثر قطر قطرات مایع در جریان گاز خروجی تعیین شد. در این پژوهش، ابعاد بهینه جداساز با استفاده از یک روش ترکیبی جدید ارائه شده است. در روش ترکیبی جدید ارائه شده ابتدا شبیه‌سازی CFD جداساز دوفازی در مقیاس آزمایشگاهی انجام گردید. سپس شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شدند. همچنین دامنه بهینه برای نسبت لاغری جداساز تعیین شد. در نهایت با استفاده از روابط نوین ارائه شده به‌صورت تحلیل ابعادی، ابعاد جداساز تعیین و سپس عملکرد جداساز دوفازی طراحی شده با استفاده از مدل شبیه‌سازی CFD اعتبارسنجی شد. نتایج اعتبارسنجی نشان دادند که روش جدید ارائه شده قابلیت بالایی در طراحی جداسازهای گاز-مایع دارد. مقدار خطای نسبی بین نتایج مدل CFD توسعه داده‌شده و داده‌های آزمایشگاهی کمتر از ۷٪ بود. به‌منظور استفاده میدانی از روش نوین ارائه‌شده، ابعاد جداساز دوفازی سطحی برای یکی از چاه‌های تولیدی واقع در میدان گازی پارس جنوبی تعیین شد. یکی از مهم‌ترین دست‌آوردهای این پژوهش فراهم نمودن بستر لازم برای طراحی بهینه و ساخت جداسازهای سطحی برای استفاده‌های میدانی است.

کلمات کلیدی: رویکرد، جدید، طراحی، جداساز، افقی

مقدمه

سیال تولیدی از مخازن هیدروکربوری ترکیبی از هیدروکربن‌های مختلف است که به‌دلیل تغییر شرایط دما و فشار نسبت به شرایط مخزن، جریان دوفازی گاز و مایع تشکیل می‌شود. فرآیند جداسازی فازهای تولید شده در سطح نیازمند تجهیزات لازم از جمله جداسازهای چندفازی است. یکی از مکانیزم‌های اصلی در جداسازها، جدایش ثقلی گاز و مایع با استفاده از اختلاف چگالی بین دوفاز است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی ameri@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4751.3131)

بنابراین بررسی و تعیین شرایط عملیاتی بهینه و همچنین دست‌یابی به طراحی دقیق ابعاد جداسازهای چندفازی علاوه‌بر افزایش راندمان جداسازی، برروی کاهش هزینه‌های اقتصادی و دست‌یابی به درآمد بیشتر حاصل از تولید محصولات با ارزش تأثیر چشم‌گیری خواهد داشت. در طراحی فرآیندی جداسازها، طول و قطر مناسب برای جداساز طراحی می‌شود. برای طراحی جداسازهای چندفازی، وجود یک واحد سامانه آزمایشگاهی به‌منظور بررسی راندمان جداساز در شرایط مختلف عملیاتی ضروری است. در این مطالعه، ابعاد بهینه جداساز با استفاده از یک روش ترکیبی جدید ارائه می‌شود. در این روش جدید، شبیه‌سازی CFD جداساز دوفازی در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌گردد. سپس نتایج شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده اعتبارسنجی می‌گردند. در این پژوهش، دامنه بهینه نسبت لاغری جداساز ارائه می‌گردد. در نهایت با استفاده از روابط جدید ارائه‌شده تحلیل ابعادی، ابعاد جداساز تعیین شد. به‌منظور کاربرد میدانی، با استفاده از روش نوین ارائه شده برای یکی از چاه‌های تولیدی پارس جنوبی ابعاد جداساز گاز-مایع تعیین گردید. در این پژوهش ابتدا مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه طراحی جداساز ارائه می‌شود. اولین روابط تئوری طراحی جداساز چندفازی سرچاهی توسط سودرز و براون [۱] ارائه شد. با استفاده از روابط ارائه شده توسط سودرز و براون [۱] سرعت ظاهری فاز پیوسته که در این مطالعه فاز گاز بود محاسبه گردید. دیگر محققان نیز با تغییر در روابط نیمه‌تجربی ارائه‌شده توسط سودرز و براون [۱] از آن بهره بردند. چیلینگریان و همکاران [۲] روشی برای طراحی جداساز چندفازی سرچاهی ارائه کردند که بیشتر جنبه آزمایشگاهی و عملیاتی داشت. روش آنها بر پایه این فرض بود که حجم جداساز چه مقدار باشد تا بتواند دبی گاز و مایع را در خود جای دهد، نه اینکه طراحی ابعادی آن چگونه باشد تا بهترین جدایش صورت گیرد. مانری و سروک [۳] روابط نیمه‌تجربی برای طراحی انواع جداسازهای چندفازی افقی و قائم ارائه نمودند. از مهم‌ترین نواقص مشاهده شده در پژوهش مانری و سروک [۳] می‌توان به عدم ارائه ابعاد بهینه جداساز اشاره نمود. بویانگو و همکاران [۴] روشی برای انتخاب جداساز چندفازی سرچاهی ارائه کردند. در این روش، با استفاده از جدول جداسازهای استاندارد ارائه شده و چند رابطه ساده، جداساز مناسب انتخاب می‌شود که از مهم‌ترین کاستی این تحقیق عدم ارائه ابعاد استاندارد جداساز چندفازی سرچاهی است. ویلکینسون و همکاران [۵]یکی از مفصل‌ترین فرآیندهای طراحی جداساز را با استفاده از شبیه‌سازی CFD و رویکردهای تجربی انجام داد. روش آنها با ساخت یک مدل آزمایشگاهی از یک جداساز در مقیاس آزمایشگاهی آغاز شد و با ارزیابی کارایی و روش طراحی جداساز چند فازی در مقیاس میدانی با استفاده از شبیه‌سازی CFD به پایان رسید. از کاستی‌های قابل توجه این پژوهش این بود که درصد باز شدن صفحات مشبک در مدل‌های آزمایشگاهی و CFD با یکدیگر متفاوت بود و دقت مقایسه را بسیار کاهش داده و از نرم‌افزار PHOENICS برای تجزیه و تحلیل نتایج استفاده شده بود. از مزایای پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش انجام شده توسط ویلکینسون و همکاران [۵]مدل‌سازی دقیق جداکننده آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent است، زیرا نرم‌افزار PHOENICS شامل روابط توصیف‌کننده جریان‌های چندفازی نیست و از مدل‌های چندفازی بسیار ساده مانند مدل مخلوط استفاده می‌کند. هانسن [۶] جریان دوفازی را در یک جداساز افقی با استفاده از CFD شبیه‌سازی کرد. وی نتیجه گرفت که CFD می‌تواند پیش‌بینی‌های بهتری را نسبت به روش‌های دیگر انجام دهد.

از مزایای این پژوهش نسبت به پژوهش انجام شده توسط هانسن [۶] در نظر نگرفتن شکست قطرات مایع[1] است. پور احمدی لاله [۷] از روش CFD برای شبیه‌سازی جداکننده‌های چندفازی در مقیاس آزمایشگاهی استفاده کرد. وی از مدل اغتشاش چندفازی k-epsilon استفاده کرد. نتایج ایشان اختلاف چشم‌گیری بین نتایج آزمایش و نتایج CFD را نشان می‌دهد، که به‌دلیل انتخاب نامناسب روش مدل‌سازی است. فرض یک دیوار بدون اصطکاک در سطح تماس گاز و مایع باعث جذب قطرات مایع شده و به همین دلیل این مدل نمی‌تواند پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز را پیش‌بینی کند و به همین دلیل اختلاف چشم‌گیری بین نتایج آزمایشگاهی و CFD مشاهده می‌شود. برتری پژوهش حاضر نسبت به پژوهش مذکور این است که هیچ دیواره بدون اصطکاکی در سطح تماس مایع و گاز فرض نشده و پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز در فرآیند شبیه‌سازی CFD به‌خوبی نشان داده می‌شود و باعث می‌شود نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD بسیار نزدیک‌تر به نتایج تجربی باشند.

آرنولد و استوارت [۸] طراحی جداساز را به‌صورت تئوری و عملی ارائه کردند. اما در روش ارائه شده آنها، فرضیات ساده‌کننده نظیر ثابت فرض کردن سرعت سقوط قطرات مایع، فرض‌کردن سقوط قطره از بالاترین نقطه جداساز، عدم در نظر گرفتن اثر حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز و اثر منحرف‌کننده ورودی و جریان مغشوش در ورودی و نزدیک دیواره جداساز در نظر گرفته شدند. غفارخواه [۹] ابعاد جداسازهای چندفازی را با استفاده از دو روش آرنولد-استوارت[2] و مونری-سروک[3] تعیین کرد. سپس با استفاده از ترکیب دو مدل حجم‌سیال[4] و مدل فاز گسسته[5]، همراه با مدل اغتشاش کا-اپسیلون برای مطالعه رفتار سیال و راندمان جداسازی در جداساز استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی CFD نشان داد که مقدار سرعت و مقدار انرژی جنبشی در روش مانری-سروک از آرنولد-استوارت بالاتر بوده و میزان نگه‌داشت مایع در روش مانری-سروک افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان داد که جداساز آرنولد-استوارت در بخش آب و نفت کارایی بالاتری در جداسازی فازها دارد. از نقاط قوت پژوهش حاضر نسبت به مطالعه غفارخواه [۹] مقایسه نتایج شبیه‌سازی CFD با نتایج تجربی است که در نهایت منجر به انتخاب بهترین مدل CFD برای شبیه‌سازی یک جداساز چندفازی می‌شود. آچاریا [۱۰] از شبیه‌سازی CFD برای تعیین دو پارامتر "زمان اقامت متوسط" و "توزیع زمان اقامت" به‌عنوان توابع مقادیر مختلف کسر حجمی آب در جریان ورودی به جداساز استفاده کرده و نتایج آنها را با نتایج تجربی محققان قبلی با همان هندسه مقایسه کرد. همچنین میانگین زمان ماند نفت را براساس توزیع زمان اقامت ارزیابی کرد و نشان داد که میانگین زمان ماند با کسر حجمی آب در جریان ورودی به جداساز افزایش می‌یابد. از نقاط ضعف این پژوهش می‌توان به شبیه‌سازی دو بعدی و عدم بررسی توزیع اندازه ذرات اشاره نمود. از جمله نقاط قوت پژوهش حاضر نسبت به پژوهش آچاریا [۱۰] می‌توان به شبیه‌سازی CFD به‌صورت سه بعدی و تعیین قطر قطرات مایع در خروجی گاز جداساز اشاره نمود. احمد و همکاران [۱۱] دو جداساز آزمایشگاهی موجود را با کیفیت حجمی گاز بالا و پایین با استفاده از CFD شبیه‌سازی کردند تا اثر دبی مایع (نفت و آب) و ارتفاع موج در جداساز اول و اثر دبی ورودی در جداساز دوم را بررسی کنند. به‌منظور شبیه‌سازی الگوی جریان و رفتار فازی سیالات در هر جداساز، از دو مدل چندفازی اولرین و حجم‌سیال استفاده شد. بازده جداسازی در این شبیه‌سازی با هر مدل مختلف در مقایسه با داده‌های تجربی تا ۳۰٪ خطا داشت.

1. Droplet Break-Up
2. Arnold-Stewart
3. Monnery-Svrcek
4. Volume Of Fluid (VOF)
5. Discrete Phase Model (DPM)

از مزایای این مقاله استفاده از مدل حجم‌سیال و مدل فاز گسسته به‌همراه مدل اغتشاش کا-اپسیلون در شبیه‌سازی است که در مقایسه با داده‌های تجربی حداکثر خطای نسبی برابر با ۸٪ دارد.

روش نیمه‌تجربی آرنولد- استوارت

در این روش به‌منظور طراحی جداساز گاز-مایع، دو قید ظرفیت گاز و ظرفیت مایع تعیین می‌شوند. جداساز باید دبی مشخصی از گاز را به‌صورتی در خود جای دهد که قطرات مایع درون فاز پیوسته گاز فرصت سقوط به‌سمت فاز پیوسته مایع را پیدا کنند. جداساز همچنین باید حجمی برای مایع فراهم کند تا زمان ماند کافی تأمین شده و حباب‌های گاز نیز از مایع خارج شده و دو فاز به تعادل برسند. بنابراین ابعاد جداساز برای هر کدام از دو ظرفیت به‌صورت مجزا طراحی می‌شوند.

قید ظرفیت گاز

تعیین ابعاد جداساز به‌منظور جدایش قطرات مایع از جریان گاز به‌سرعت قطرات مایع وابسته است. هر چقدر سرعت سقوط قطرات مایع بیشتر باشد، ابعاد کوچکتری برای جدا شدن آنها از فاز پیوسته گاز ضروری خواهد بود. از سوی دیگر، سرعت سقوط ذرات از اندازه آن‌ها تأثیر می‌پذیرد. بدین ترتیب، دانستن اندازه قطرات و سرعت سقوط آن‌ها در تعیین ابعاد جداساز بسیار حائز اهمیت است. رابطه ۱، رابطه حد گاز را برای جداسازهای دوفازی بیان می‌کند که در حالت شرایط سطحی است [۱۵].

$$d \times L_{eff} = 420\frac{TZQ_g}{P}\sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l-\rho_g}\right)\frac{C_D}{d_P}} \qquad (۱)$$

قید ظرفیت مایع

پارامتر اصلی در طراحی جداساز بر مبنای قید ظرفیت مایع، زمان ماند است. زمان ماند بدین معنا است که جریان مایع به‌طور متوسط برای چه مدت زمانی در جداساز می‌ماند. هر چه این مدت زمان بیشتر باشد، ابعاد جداساز نیز باید بزرگتر گردد.

طراحی جداسازها باید به گونه‌ای انجام شود که زمان ماند مایع تأمین شود [۱۵]. رابطه زیر برای تعیین ابعاد جداسازهای نیمه‌پر با دبی حجمی مایع و زمان ماند معلوم قابل استفاده است:

$$d^2 \times L_{eff} = Q_l t_r \qquad (۲)$$

در رابطه ۲ حاصل‌ضرب دبی حجمی مایع در زمان ماند آن برابر است با حجمی که مایع در جداساز اشغال می‌کند. این رابطه فقط برای زمانی که جداساز به‌حالت نیمه‌پر باشد صادق است و در غیر این صورت یک ضریب به رابطه افزوده می‌شود.

مدل حجم سیال

این مدل به‌منظور ردیابی فصل مشترک بین چند سیال امتزاج‌ناپذیر طراحی شده است. در این مدل یک سری روابط تکانه به جریان چندفازی اختصاص داده می‌شود و درصد هر یک از فازها در هر سلول با ردیابی کسر حجمی در هر سلول تعیین می‌گردد. مدل حجم‌سیال برای جریان‌های لایه‌ای، جریان سطح آزاد، حرکت حباب در یک مایع یا قطره در گاز، حرکت جت سیال و رهگیری پایا یا ناپایای هر نوع فصل مشترک گاز- مایع قابل استفاده است [۱۶]. با استفاده از رابطه ۳ کسرحجمی فاز گاز در جریان دوفازی که نسبت لغزش برابر با واحد نباشد، تعیین می‌گردد [۱۷].

$$\alpha = \left[1+\frac{(1-x)}{x}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)S\right]^{-1} \alpha \qquad (۳)$$

روش حل به این صورت است که روابط پیوستگی و تکانه برای کل محدوده محاسباتی حل می‌شود، که شامل مراحل مختلف است. در حل این روابط، خصوصیات سیال از جمله چگالی و ویسکوزیته محاسبه و با توجه به ترکیب فازهای مختلف با استفاده از قوانین مخلوط جایگزین می‌شوند و ترم کشش سطحی به رابطه تکانه اضافه می‌شود. وقتی دو فاز در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، یک پیوستگی از سرعت و تنش در فازها به‌وجود می‌آید. این بدان معنی است که سرعت و تنش دو فاز در رابطه برابر است، اما به‌دلیل کشش سطحی، ترم

فشار دارای جهش است. این جهش برای حباب به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta = \frac{2\sigma}{R} \qquad (۴)$$

در رابطه بالا، ΔP اختلاف فشار بین داخل و خارج حباب است. اگر قرار باشد حباب به‌طور مداوم و هنگام حرکت بررسی شود، گفته می‌شود که فشار محیط با پرش روی سطح آن به فشار داخل حباب تبدیل می‌شود. لازم به‌ذکر است که این بحث تعادل در تمام جریان‌های چندفازی صادق است. در روش حجم سیال، علاوه‌بر رابطه پیوستگی، یک سری روابط حرکت برای دامنه محاسبات نیز به‌شرح زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_j)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i U_j)= -\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)+\rho g_i+F_i \qquad (۵)$$

ترم آخر ترم در مورد نیروهای کشش سطحی به‌عنوان یک نیروی خارجی اعمال شده بر حجم شبیه‌سازی شده است.

$$F_t = \frac{\sigma K \delta_n}{V} \qquad (۶)$$

مراحل انجام آزمایش‌های تجربی

ورودی جداساز یک زانویی °۹۰ است و در انتهای جداساز خروجی گاز و مایع وجود دارد. برای کنترل سطح مایع از ارتفاع‌سنج استفاده شد. برای اندازه‌گیری فشار و دمای جداساز در طول آزمایش از گیج‌های فشار و دما استفاده شده است.

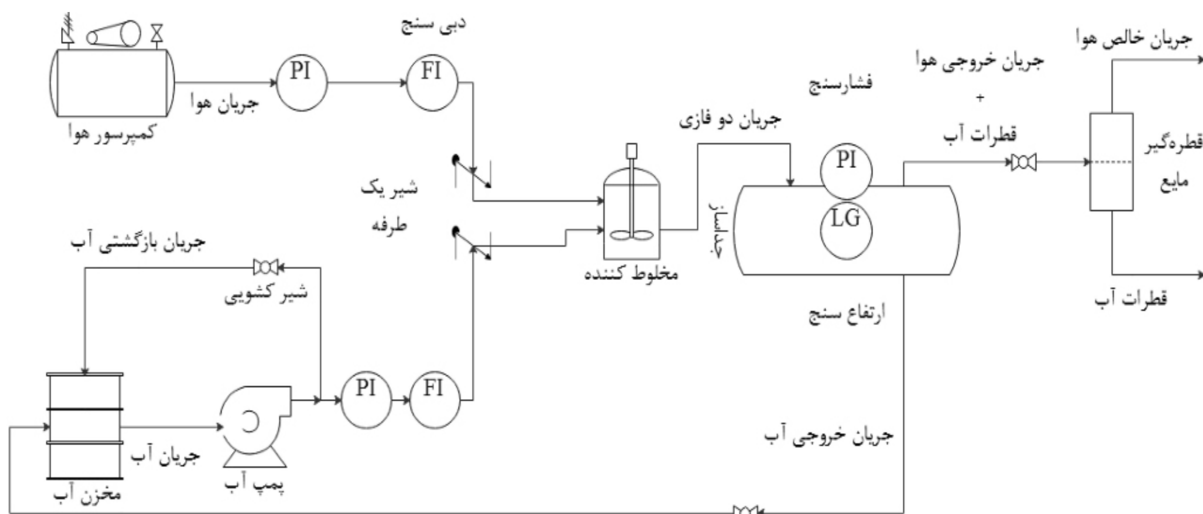
مدار جریان دوفازی گاز-مایع

برای ارزیابی عملکرد جداساز دو فاز مایع-گاز، یک مدار جریانی دو فازی (مایع-گاز) طراحی و ساخته شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان آب توسط پمپ آب از مخزن آب به مدار جریانی پمپ می‌شود و پس از اندازه‌گیری میزان جریان آن توسط روتامتر آب و تعیین دما و فشار آن، با جریان گاز حاصل از کمپرسور هوا در نقطه اختلاط توسط یک مخلوط‌کننده استاتیک تشکیل جریان دو فازی می‌دهند. جریان دوفازی تشکیل شده پس از طی فاصله به اندازه ۱۶۰ برابر قطر خط لوله، به جریان دو فازی توسعه یافته تبدیل می‌شود. جریان هوا نیز که توسط کمپرسور هوا تأمین می‌شود، قبل از ورود به نقطه اختلاط، دبی جریان، دما و فشار آن به‌ترتیب توسط دبی‌سنج هوا و گیج‌های دما و فشار اندازه‌گیری می‌شوند. جریان دو فاز گاز و مایع پس از ورود به جداساز دو فازی به فازهای اصلی جدا می‌شوند. جداساز دو فازی گاز-مایع در سطوح مختلفی از مایع (۱۰، ۵۰ و ۹۰٪ از ارتفاع کل جداساز) و در نرخ‌های مختلفی از جریان مایع و گاز مورد بررسی قرار گرفت. یک فیلتر که طبق کاتالوگ می‌تواند قطرات مایع با قطر µm ۲۰ را جذب کند، در خروجی گاز نصب شد. اندازه‌گیری قطر قطرات آب در جریان هوا با استفاده از یک سیستم عکاسی انجام شد و فیلتر از سه جهت مختلف برای به حداقل رساندن اثرات شکست نور عکس‌برداری شد. سپس قطر قطرات مایع که در حین حرکت با هم ادغام نشده‌اند، با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر دیجی‌مایزر[1] و مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین قطر قطرات مایع، براساس مقیاس روی خط‌کش اندازه‌گیری شد. این عکس‌برداری با سرعت ۳۰ فریم در ثانیه با استفاده از دوربین ۲۵ مگاپیکسلی با قابلیت بزرگ‌نمایی تا ۱۰ برابر انجام شد و وزن قطرات مایع به دام افتاده با استفاده از ترازو با دقت g ۰/۰۱ انجام شد.

تفسیر و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

آزمون‌های آزمایشگاهی در حالت‌های مختلف ارتفاع مایع درون جداساز (۱۰، ۵۰ و ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز) و با دبی‌های سیال و فشارهای مختلف انجام شد. هر کدام از آزمایش‌ها برای دو حالت متفاوت خروجی، یک بار در میانه جداساز (cm ۴۵) و یک بار در انتهای آن (cm ۹۰) انجام شد تا دو طول مؤثر مختلف جداساز در نظر گرفته شوند.

---
1. Digimizer

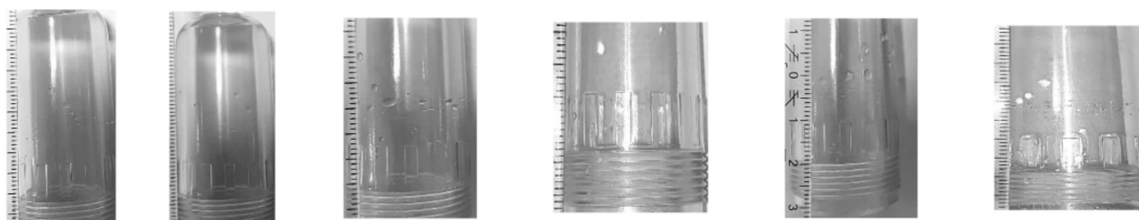


شکل ۱ سامانه آزمایشگاهی دوفازی گاز- مایع

لازم به ذکر است که به‌منظور اطمینان از نتایج آزمایش‌ها، هر آزمایش سه مرتبه تکرار شد و نتایج در تمام موارد کاملاً هم‌خوانی داشتند. در این آزمایش‌ها ارتفاع سطح مایع در جداساز، فاصله بین ورودی و خروجی جداساز، فشار و دبی گاز تغییر داده می‌شوند. جدول ۱ برخی از نتایج آزمایش‌های انجام شده را به‌منظور تفسیر نتایج نشان می‌دهد. واضح‌ترین نتیجه‌ای که می‌توان از نتایج تجربی گرفت این است که طول مؤثر جداساز با بیشینه قطر قطرات مایع در خروجی گاز رابطه عکس دارد. همان‌طور که در تمام آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود، قطرات مایع در خروجی نزدیکتر به ورودی جداساز (طول مؤثر کمتر) بزرگتر هستند. دلیل این پدیده نیز در آن است که با کمتر شدن فاصله بین ورودی و خروجی جداساز، فرصت سقوط و جداسازی در اختیار قطرات مایع موجود در جریان گاز نیز کمتر می‌شود. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که افزایش بیش از اندازه طول مؤثر می‌تواند باعث رخ دادن پدیده حمل مجدد قطرات مایع توسط جریان گاز و افزایش مجدد قطر قطرات مایع در خروجی گاز شود. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، هر چقدر سطح مایع در جداساز پایین‌تر باشد بیشینه اندازه قطر قطره مایع در خروجی گاز جداساز افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آب از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز به ۹۰٪، بیشینه قطر قطرات آب به‌طور متوسط ۷۲٪ کاهش یافته و با کاهش سطح مایع از ۵۰٪ کل ارتفاع جداساز به ۹۰٪، بیشینه قطر قطرات آب به‌طور متوسط ۲۱۱٪ افزایش می‌یابد. زیرا با کاهش ارتفاع سطح مایع، مسافت طی‌شده برای این که قطرات مایع به‌سطح مشترک گاز و مایع برسند افزایش یافته و مسلماً به طول بیشتری جهت جداسازی قطرات نیاز خواهد بود، لذا قطرات بزرگتری فرصت رسیدن به جریان مایع را از دست می‌دهند. با توجه به جدول ۱، افزایش دبی گاز در ورودی نیز می‌تواند باعث افزایش بیشینه اندازه قطر قطرات مایع در خروجی گاز شود زیرا با بیشتر شدن دبی گاز در ورودی، قطرات مایع موجود در جریان گاز درون جداساز با سرعت بیشتری به‌سمت خروجی رفته و زمان کافی برای سقوط، رسیدن به جریان مایع و جداسازی را پیدا نمی‌کنند. همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود برای حالتی که سطح مایع ۱۰٪ ارتفاع کل جداساز، فشار ۱۰۱/۲۲۵ Pa و دبی گاز ۱۹ m^3/h است، قطرات آب با قطر ۳۱۵ μm در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۲ قسمت الف نشان داده شده است.

جدول ۱ نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی با واحد سامانه

سطح مایع جداساز	فشار (Pa)	دما (°C)	دبی گاز (m^3/h)	چگالی گاز (kg/m^3)	چگالی مایع (kg/m^3)	طول موثر جداساز (m)	حداکثر قطر قطره مایع خروجی از خروجی گاز در انتهای جداساز (m)	حداکثر قطر قطره مایع خروجی از خروجی گاز در نصفه جداساز (µm)
۱۰	۱۰۱۲۲۵	۲۶	۱۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۳۱۵	۴۷۰
۱۰	۲۰۲۴۵۰	۲۶	۲۳/۶	۲/۳۲	۹۹۸	۰/۹	۴۲۸	۶۳۸
۵۰	۱۰۱۲۲۵	۲۶	۱۸/۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۱۲۹	۲۲۲
۵۰	۲۰۲۴۵۰	۲۶	۲۳/۶	۲/۳۲	۹۹۸	۰/۹	۱۳۸	۴۳۹
۵۰	۲۵۳۰۶۲	۲۶	۳۵/۴	۲/۹۱	۹۹۸	۰/۹	۴۵۰	۷۸۰
۹۰	۱۰۱۲۲۵	۲۶	۱۸/۹	۱/۲	۹۹۸	۰/۹	۴۰	۶۲



الف　ب　ج　د　ه　پ

شکل ۲ تصویر قطرات آب در جریان هوا در خروجی گاز جداساز

وقتی خروجی گاز در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود قطرات با قطر بزرگتر از ۳۱۵ µm (برابر با ۴۷۰ µm) در خروجی گاز مشاهده می‌شوند که در شکل ۲ قسمت ب نشان داده شده است. درحالتی‌که سطح مایع ۵۰٪ ارتفاع کل جداساز، فشار عملیاتی برابر با ۱۰۱/۲۲۵ Pa و دبی گاز برابر با ۱۸/۹ m^3/h است که در خروجی گاز با فاصله ۹۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر ۱۲۹ µm مشاهده شدند که در شکل ۲ قسمت ج نشان داده می‌شود. درحالتی‌که خروجی گاز در فاصله ۴۵ cm از ورودی جریان دوفازی نصب شود، قطرات با قطر ۲۲۲ µm در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۲ قسمت د نشان داده می‌شود. درحالتی‌که سطح مایع ۹۰٪ ارتفاع کل جداساز، فشار عملیاتی برابر با ۱۰۱/۲۲۵ Pa و دبی گاز برابر با ۹/۱۸ m^3/h است، در خروجی گاز با فاصله ۹۰ cm از ورودی جریان دوفازی قطرات با قطر ۴۰ µm مشاهده شدند و در خروجی گاز با فاصله ۴۵ cm از ورودی جریان دو فازی قطرات آب با قطر حداکثری برابر با ۶۲ µm مشاهده شدند. درحالتی‌که جداساز نیمه‌پر و فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲/۴۵۰ Pa و دبی گاز برابر با ۳۵/۴ m^3/h است، وقتی فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز برابر با ۹۰ cm باشد قطرات آب با قطر ۴۵۰ µm در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۲ قسمت ه نشان داده شده است؛ درحالی‌که فاصله نمونه‌گیر تا ورودی جداساز برابر با ۴۵ cm است قطرات آب با قطر ۷۸۰ µm در خروجی گاز مشاهده شدند که در شکل ۲ قسمت و نشان داده شده است. در حالت اول کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز برابر با ۱/۸٪ و در حالت دوم برابر با ۲/۵٪ بود. برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با ۱۰٪ کل ارتفاع جداساز، فشار عملیاتی برابر با ۲۰۲/۴۵۰ پاسکال و دبی گاز برابر با ۲۳/۶ m^3/h باشد، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با ۲/۱٪ به‌دست آمد.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۹-۳

درحالتی‌که خروجی گاز جداساز در فاصله 45 cm از ورودی نصب شود مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازی برابر با ۲/۸٪ به‌دست آمد. برای حالتی که سطح مایع جداساز برابر با ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز، فشار عملیاتی برابر با ۱۰۱/۲۲۵ پاسکال و دبی گاز برابر با $18/9\ m^3/h$ باشد، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز برابر با ۰/۵٪ به‌دست آمد. درحالتی‌که خروجی گاز جداساز در فاصله 45 cm از ورودی نصب شود، مقدار کسر حجمی مایع در خروجی گاز جداساز دوفازی برابر با ۰/۶۹٪ به‌دست آمد.

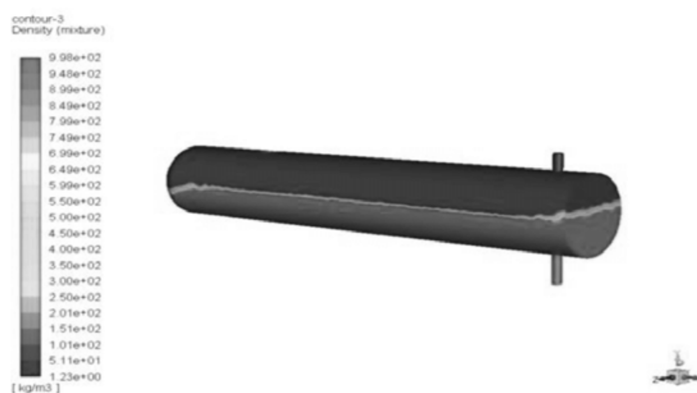
تفسیر نتایج شبیه‌سازی CFD و اعتبارسنجی

به‌منظور شبیه‌سازی آزمایش‌های تجربی جداساز گاز-مایع با توجه به ابعاد و مشخصات جداساز گاز-مایع طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه، خصوصیات جریان دوفازی (آب و هوا) و شرایط عملیاتی حاکم بر آزمایش تجربی از نرم‌افزار گمبیت[1] به‌منظور ایجاد هندسه جداساز استفاده گردید. نرم‌افزار گمبیت جهت ساخت مش استفاده می‌گردد. جهت ساخت مدل CFD، مدل خروجی از نرم‌افزار گمبیت به‌عنوان ورودی نرم‌افزار فلوئنت استفاده می‌گردد. سپس با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت[2] شرایط آزمایش تجربی از جمله خصوصیات سیال دوفازی، شرایط مرزی، مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های حل به‌طور کامل بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی به‌دست آمده مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفت. نوع مش‌های ایجاد شده به‌صورت چهار ضلعی[3] بوده و برای بررسی اثر جریان در نزدیکی دیواره لوله از توابع استاندارد دیواره استفاده گردید. شرایط مرزی ورودی به‌صورت مرز ورودی جریان[4] با دبی‌های مشخص آب و هوا و مرزهای خروجی جداساز چون جریان دوفازی به محیط می‌ریزد به‌صورت مرزهای جریانی خروجی[5] و دیواره‌های جداساز به‌صورت شرایط مرزی دیواره در نظر گرفته شد. فضای داخلی جداساز به‌صورت فضای جریانی[6] در نظر گرفته شد که مانع حرکت جریان دوفازی نگردد. شتاب جاذبه برابر با $9/81\ m/s^2$ به‌سمت پایین در جهت محور yها در نظر گرفته شد. در قسمت مدل‌ها، از مدل چندفازی اولرین-اولرین استفاده شد. مدل ویسکوزیته کا-اپسیلون استاندارد جهت مدل‌سازی اغتشاش استفاده شد. به‌منظور بررسی اثرات آشفتگی و خصوصیات جریان چندفازی در نزدیک دیواره جداساز، توابع استاندارد دیواره در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور مدل‌سازی و تشخیص دقیق‌تر مرزهای بین فازی، از مدل حجم‌سیال[7] استفاده شد. تعداد سلول‌های شبیه‌سازی برابر با ۷۵۶۴۰۰ بود که پس از انجام آنالیز استقلال شبکه‌بندی تعیین گردید. شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال جداساز دوفازی مایع-گاز با توجه به مراحل ارائه شده انجام شد که نتایج آن در ادامه بیان شده است. شبیه‌سازی جداساز برای سه ارتفاع مایع متفاوت (۱۰، ۵۰ و ۹۰٪ کل ارتفاع جداساز) و دو محل نمونه‌گیری متفاوت (انتهای جداساز با فاصله 90 cm از ورودی جداساز و میانه جداساز با فاصله 45 cm از ورودی جداساز) انجام شد. تمام نتایج به‌دست آمده از تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. ابتدا نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده با طول مؤثر و ارتفاع سطح مایع متغیر مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای ارتفاع مایع ۵۰٪، دبی گاز برابر با $35/4\ m^3/h$ و فشار عملیاتی برابر با Pa ۲۵۳۰۶۲ است. کانتورهای کسرحجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز به‌ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به‌صورت تجربی برابر با ۱/۸٪ تعیین شد.

1. Gambit
2. Fluent
3. Quad
4. Mass Flow Inlet Boundary
5. Out Flow Boundary
6. Interior
7. Volume Of Fluid (VOF)



شکل ۳ کانتور کسر حجمی هوا در جداساز در حالت نیمه‌پر و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی



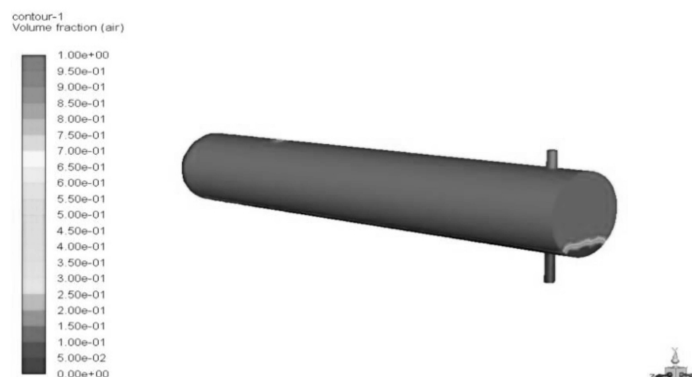
شکل ۴ کانتور چگالی مخلوط در جداساز در حالت نیمه‌پر و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی

نتایج دینامیک محاسباتی سیال نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۱/۶۵٪ آب وجود دارد که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود، کسر حجمی آب در خروجی گاز به‌صورت تجربی برابر با ۲/۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال، کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۲/۴٪ نشان داد که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای ارتفاع مایع ۱۰٪، دبی گاز برابر با ۴/۳۵ m³/h و فشار عملیاتی برابر با ۲۵۳/۰۶۲ Pa است. کانتورهای کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به‌صورت تجربی برابر با ۱/۲٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۱/۹٪ آب وجود دارد که در شکل ۶ نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود کسر حجمی آب در خروجی گاز به‌صورت تجربی برابر با ۲/۸٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۲/۶٪ نشان داد. کانتور چگالی ترکیب در جداساز در شکل ۸ نشان داده شده است. برای حالتی که ارتفاع سطح آب ۹۰٪، دبی گاز برابر با ۳۵/۴ m³/h و فشار عملیاتی برابر با ۲۵۳/۰۶۲ Pa بود. کانتورهای کسر حجمی هوا و چگالی ترکیب در جداساز در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. در این حالت کسر حجمی آب در جریان گاز خروجی به‌صورت تجربی برابر با ۰/۵٪ تعیین شد و نتایج دینامیک محاسباتی سیال نشان می‌دهد که در خروجی گاز جداساز ۰/۴۶٪ آب وجود دارد که در شکل ۹ نشان داده شده است. برای حالتی که نمونه‌گیر در فاصله ۴۵ cm از ورودی نصب شود، کسر حجمی آب در خروجی گاز به‌صورت تجربی برابر با ۰/۶۹٪ تعیین شد.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۹-۳



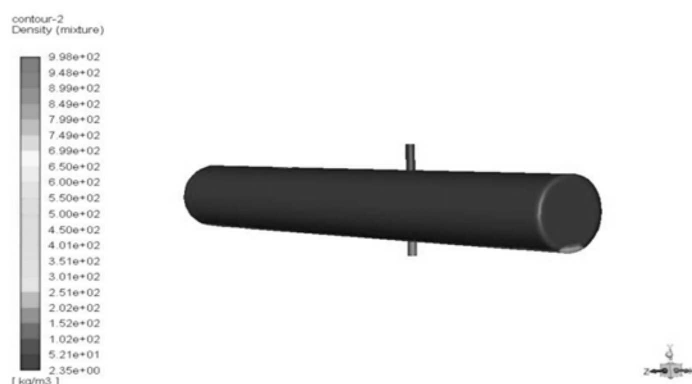
شکل ۵ کانتور کسر حجمی هوا در جداساز در حالت نیمه‌پر و فاصله ۴۵ cm بین خروجی و ورودی



شکل ۶ کانتور کسر حجمی هوا در جداساز با ارتفاع سطح مایع ۱۰٪ و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی



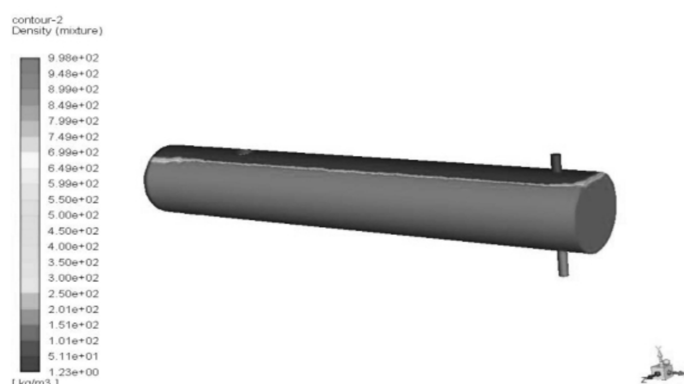
شکل ۷ کانتور چگالی مخلوط در جداساز با ارتفاع سطح مایع ۱۰٪ و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی



شکل ۸ کانتور چگالی مخلوط در جداساز با ارتفاع سطح مایع ۱۰٪ و فاصله ۴۵ cm بین خروجی و ورودی



شکل ۹ کانتور کسر حجمی هوا در جداساز با ارتفاع سطح مایع ۹۰٪ و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی



شکل ۱۰ کانتور چگالی مخلوط در جداساز با ارتفاع سطح مایع ۹۰٪ و فاصله ۹۰ cm بین خروجی و ورودی

نتایج دینامیک محاسباتی سیال کسر حجمی آب در خروجی گاز جداساز را برابر با ۰/۶۳٪ نشان داد. نتایج مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با داده‌های تجربی متناظر در جدول ۲ قابل مشاهده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل شبیه‌سازی دینامیک محاسباتی سیال ساخته شده با خطای نسبی کمتر از ۷٪ در مقایسه با داده‌های تجربی معتبر است و می‌توان به نتایج حاصل از آن برای شرایطی که انجام آزمایش تجربی مربوطه ممکن نیست اعتماد کرد.

تعیین ابعاد جداساز سطحی با استفاده از آنالیز ابعادی

روش تحلیل ابعادی، روشی ساده برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز در یک مسأله است روش تحلیل ابعادی، بر مبنای اصل همگنی ابعادی، سعی می‌کند یک مسأله فیزیکی را تبدیل به مسأله‌ای متشکل از کمیت‌های بدون بعد کند. تحلیل ابعادی اگر درست انجام گیرد از ارزش زیادی برخوردار است. اصل همگنی ابعادی می‌گوید دو طرف یک رابطه، باید به لحاظ ابعاد (جرم، طول و زمان) یکسان باشند. در روش تحلیل ابعادی هدف آن است که متغیرهای موثر بر مسأله را به‌صورت گروه‌های بی‌بعد بیان کرد. قضیه پی باکینگهام می‌گوید: اگر تابعی با تعداد n متغیر به‌طور ابعادی همگن باشد، آن را می‌توان به‌صورت رابطه ساده بین "n – m" حاصل ضرب بی‌بعد مستقل در آورد که m کمترین تعداد بعدهای مرجع لازم برای بیان متغیرها است. با استفاده از روش تحلیل ابعادی، تعداد پارامترهای مؤثر بر مسأله کاهش داده می‌شود تا بتوان با متغیرهای کمتر و بی‌بعد، مسأله را تبیین نمود. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاه، رابطه بین اعداد بی‌بعد با عملکرد جداساز به‌دست می‌آید.

جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی جداساز بدون منحرف‌کننده ورودی و مقایسه با نتایج تجربی

دبی مایع		۱/۱	دبی گاز	۳۵/۴	
فاصله نمونه‌گیر (خروجی) تا ورودی جداساز		ارتفاع سطح مایع در جداساز (٪)			
	۵۰	۱۰	۹۰		
	کسر حجمی مایع در خروجی گاز (٪)				
۹۰ cm	تجربی	۱/۸	۲/۱	۰/۵	
	عددی	۱/۶۵	۱/۹	۰/۴۶	
۴۵ cm	تجربی	۲/۵	۲/۸	۰/۶۹	
	عددی	۲/۴	۲/۶	۰/۶۳	

در نهایت براساس تشابه، نتایج حاصل از آزمایشگاه به جداسازهای درابعاد میدانی تعمیم داده می‌شود [۱۸].

پارامترهای مؤثر بر کیفیت جدایش مایع از گاز

پارامترهای متعددی بر درجه تفکیک جداساز در خروجی گاز مؤثر هستند. در رابطه ۷ پارامترهای تأثیرگذار معرفی شده‌اند. پارامترهای مؤثر بر جداسازی عبارت‌اند از:

$$\eta_{g2}=f\left(Q_1,Q_g,\frac{\mu_g}{\mu_1},D,\rho_g,L_{eff},d_p,g\Delta\rho\right) \quad (۷)$$

دقت شود در پارامترهای فوق، فشار و دما به‌عنوان متغیرهای مؤثر بر مسأله آورده نشده‌اند. فشار و دما بر خواص فیزیکی فازهای گاز و مایع از جمله چگالی آنها در شرایط جداساز تأثیر می‌گذارند. بنابراین وقتی خواص فیزیکی گاز یعنی چگالی و ویسکوزیته جزو متغیرهای تأثیرگذار مسأله ذکر شده باشند، لازم نیست فشار و دما را به‌عنوان متغیر مستقل آورد. با این کار تعداد متغیرهای بی‌بعد کاهش می‌یابد و تحلیل نتایج آسان‌تر می‌گردد. در نهایت گروه‌های بی‌بعد برای مسأله جداسازی فاز مایع از جریان گاز در جداساز دوفازی به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\pi_1=\left(\frac{Q_g}{Q_l}\right)^{10}\left(\frac{g\Delta\rho d_p^{5}\mu_g^{2}}{Q_g^{2}\rho_g\mu_l^{2}}\right)^{0.175}$$

$$\pi_2=\frac{d_p^{3}\mu_L Q_g}{D^{3}\mu_g Q_1}$$

$$\pi_3=\frac{L_{eff}}{D}$$

$$\Pi_4=\frac{\left(\frac{d_p}{D}\right)^{-1.5}}{\left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.25}}$$

$$\Pi_5=\frac{\left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.25}}{\left(\frac{Q_g}{Q_1}\right)^{0.1}} \quad (۸)$$

بنابراین کیفیت عملکرد جداساز دوفازی، در جدایش قطرات مایع از فاز گاز به‌صورت تابعی از ۵ گروه بی‌بعد به‌دست آمده است:

$$\eta_{g2}=f\left(\left(\frac{Q_g}{Q_l}\right)^{10}\left(\frac{g\Delta\rho d_p^{5}\mu_g^{2}}{Q_g^{2}\rho_g\mu_l^{2}}\right)^{0.175},\frac{d_p^{3}\mu_L Q_g}{D^{3}\mu_g Q_1},\frac{L_{eff}}{D},\frac{\left(\frac{d_p}{D}\right)^{-1.5}}{\left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0.25}},\frac{\left(\frac{d_p}{D}\right)^{0.25}}{\left(\frac{Q_g}{Q_l}\right)^{0.1}}\right) \quad (۹)$$

مهم‌ترین مسأله در طراحی بر پایه داده‌های آزمایشگاهی، نحوه تعمیم نتایج از نمونه آزمایشگاهی به نمونه صنعتی است. به‌عبارت دیگر، چه تضمینی وجود دارد که برای جداساز با ابعاد بزرگ‌تر نتایج مشابه نتایج آزمایشگاهی به‌دست آید. اگر بین مدل آزمایشگاهی و مدل صنعتی تشابه وجود داشته باشد، نتایج به‌دست آمده برای مدل آزمایشگاهی، قابل تعمیم به مدل صنعتی است. تشابه باید در سه جهت برقرار باشد؛ تشابه هندسی، تشابه سینماتیکی و تشابه جرمی، با توجه به اینکه تساوی اعداد بدون بعد بین دو مدل آزمایشگاهی و صنعتی به معنای وجود تشابه دینامیکی است، می‌توان نتیجه گرفت که تساوی اعداد بدون بعد بین دو مدل آزمایشگاهی و صنعتی در بطن خود انواع دیگر تشابه را نیز به‌همراه دارد [۱۸].

بـا اسـتفاده از بررسـی تجربـی جداسـاز آزمایشـگاهی، دبـی و چگالـی مایـع و گاز و تمـام پارامترهـای لازم بـرای جداسـاز آزمایشـگاهی تعییـن گردیدنـد. از طـرف دیگـر، فقـط طـول و قطرجداسـاز چندفـازی سـرچاهی مجهـول اسـت و سـایر پارامترهـا قابـل اندازه‌گیـری و معلـوم هسـتند. همان‌طـور کـه قبـلاً ذکـر شـد، طراحـی فرآینـدی جداسـاز در یـک معنـا بـه مفهـوم تعییـن طـول و قطـر جداسـاز اسـت. بنابرایـن، بـرای تعییـن طـول و قطـر جداسـاز چندفـازی سـرچاهی، کافـی اسـت کـه گروه‌هـای بی‌بعـد جداسـاز چندفـازی سـرچاهی را برابـر گروه‌هـای بی‌بعـد بـرای جداسـاز آزمایشـگاهی قـرار دهیـم. در ایـن صـورت بـه سـادگی مقادیـر طـول و قطـر بـرای جداسـاز چندفـازی سـرچاهی محاسـبه می‌شـود.

طراحی جداساز صنعتی

بـرای طراحـی جداسـاز سـرچاهی بـرای یکـی از چاه‌هـای تولیـدی میـدان گازی پـارس جنوبـی در ایـران بایـد شـرایط تولیـد مـورد نیـاز را داشـته باشـیم. بـه همیـن دلیـل بـا اسـتفاده از اطلاعـات جریـان تولیـدی یکـی از چاه‌هـای میـدان گازی پـارس جنوبـی در ایـران، جداساز مناسـب بـرای ایـن چـاه طراحـی شـد. در جدول ۳ شـرایط تولیـد از چـاه تولیـدی میـدان گازی پـارس جنوبـی فـاز ۹ در ایـران آورده شـده اسـت. به‌منظـور بررسـی برابـری گروه‌هـای بی‌بعـد، چـون گاز تولیـدی از چـاه تولیـدی واقـع در مخـزن گازی پـارس جنوبـی فـاز ۹، متشـکل از دوفـاز گاز و هیدروکربـن مایـع اسـت لـذا بـا اسـتفاده از قانـون ترکیـب[1] چگالـی و ویسـکوزیته متوسـط فـاز گاز تولیـدی از مخـزن محاسـبه شـده و در گروه‌هـای بی‌بعـد به‌منظـور بررسـی برابـری ایـن گروه‌هـای بی‌بعـد در دو مـدل آزمایشـگاهی و سـرچاهی اسـتفاده می‌شـوند [۱۹]. بـا برابـر قـرار دادن گروه‌هـای بی‌بعـد ارائه‌شـده در دو دسـته مقادیـر طـول و قطـر جداسـاز سـطحی بـرای شـرایط عملیاتـی ارائـه شـده کـه در خروجـی گاز حداکثـر قطـر قطـرات مایـع برابـر بـا ۱۰۰۰ μm باشـد به‌دسـت می‌آیـد. بـا حـل کـردن گروه‌هـای بدون‌بعـد دسـته اول مقادیـر طـول و قطـر جداسـاز سـرچاهی به‌ترتیـب برابـر بـا ۵۰ و ۱۴/۲ m به‌دسـت می‌آینـد کـه اصـلاً اقتصـادی نیسـت و به‌نظـر می‌رسـد کـه پارامترهـای تأثیرگـذار دسـته گـروه بـدون بعـد اول کمتـر از مقادیـر لازم در نظـر گرفتـه شـده‌اند. بـا بررسـی مجهـولات مسـأله بـرای دسـته دوم داده‌هـای بـدون بعـد مشـخص می‌شـود کـه چـون سـیالات مـورد اسـتفاده در چرخـه آزمایشـگاهی ارائـه شـده در ایـن پژوهـش آب و گاز هسـتند، پـس مقادیـر چگالـی و ویسـکوزیته هـر فـاز مشـخص هسـتند و تنهـا مجهـولات مسـأله دبـی گاز، دبـی مایـع و قطـر قطـرات مایـع در شـرایط آزمایشـگاه و طـول مؤثـر و قطـر جداسـاز سـرچاهی هسـتند.

جدول ۳ مشخصات سیالات تولیدی از چاه تولیدی میدان گازی پارس جنوبی واقع در فاز ۹

	شرایط عملیاتی					
سیال تولیدی	دبی تولیدی حجمی طراحی (m^3/h)	دبی جرمی تولیدی طراحی (kg/h)	وزن مولکولی (g/glom)	چگالی (kg/m^3)	ویسکوزیته (Pa.s)	تنش سطحی (N/m)
گاز	۱۳۷۲۱۸/۷۲	۱۱۵۶۸۸	۱۹/۹۳	۹۹	$۱۶×۱۰^{-۶}$	--
هیدروکربن های مایع	۵۳/۹۳	۱۶۹۰۰	--	۶۲۶/۷	$۱۲۷×۱۰^{-۶}$	$۱۵۷×۱۰^{-۵}$
آب	۶۰۰۰	۹۹	--	۱۱۸۶/۷	$۸×۱۰^{-۴}$	۰/۰۶۴
فشار عملیاتی (Pa)				دمای عملیاتی (°C)		
۱۲۵۰۰۱۹۴				۵۵		

1. Mixing Rule

یعنی عملاً ۵ مجهول وجود دارد که توسط ۵ رابطه که از برابر قرار دادن گروه‌های بی‌بعد $\Pi_1,...,\Pi_5$ برای هر دو حالت میدانی و آزمایشگاهی حاصل می‌شوند باید حل شوند. پس از حل روابط حاصل شده توسط گروه‌های بی‌بعد $\Pi_1,...,\Pi_5$ برای هر دو حالت میدانی و آزمایشگاهی مقادیر دبی گاز، دبی مایع و قطر قطرات مایع در شرایط آزمایشگاه به‌ترتیب برابر با ۱۸/۹ و $1\ m^3/h$ و ۱۲۹ µm و طول موثر و قطر جداساز سرچاهی نیز به‌ترتیب برابر با ۷ و ۲ m هستند. با توجه به دما و فشار عملیاتی قطر جداساز سطحی در محدوده مناسب استاندارد API12J قرار دارد [۲۰].گروه‌های بدون بعد $\Pi_1,...,\Pi_5$ برای هر دو حالت میدانی و آزمایشگاهی برابر در نظر گرفته شدند. پس از بررسی نتایج آنالیز ابعادی، ابعاد بهینه جداساز با استفاده از شبیه‌سازی CFD بررسی می‌شوند. با استفاده از رابطه شماره ۱۰، طول جوش تا جوش[۱] برای جداساز صنعتی برابر با ۹ m است. پارامتر مهم دیگری که در طراحی جداسازهای دوفازی گاز-مایع باید تعیین گردد نسبت لاغری است. با احتساب طول جوش تا جوش، سیال دوفازی ورودی پس از برخورد با منحرف‌کننده ورودی توسعه می‌یابد [۱۵].

بررسی عملکردی جداساز دوفازی سطحی طراحی شده با استفاده از شبیه‌سازی CFD

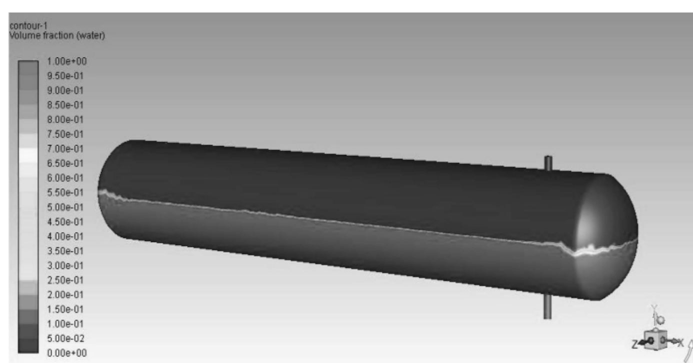
در این مرحله از مدل‌ها و روش انجام شبیه‌سازی CFD جداساز دوفازی آزمایشگاهی که طبق نتایج تجربی به‌دست آمده اعتبارسنجی شدند استفاده می‌شود. در قسمت مدل‌ها، از مدل چندفازی اولرین-اولرین استفاده شد. مدل ویسکوزیته کا-اپسیلون استاندارد جهت مدل‌سازی اغتشاش استفاده شد. به‌منظور بررسی اثرات آشفتگی و خصوصیات جریان چندفازی در نزدیک دیواره جداساز، توابع استاندارد دیواره در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور مدل‌سازی و تشخیص دقیق‌تر مرزهای بین فازی، از مدل حجم‌سیال استفاده شد. تعداد سلول‌های شبیه‌سازی جداساز سرچاهی گاز-مایع برابر با ۲۳۴۵۶۰۰ بود. در فرآیند شبیه‌سازی CFD حداکثر و متوسط قطر قطرات مایع در جریان دوفازی به‌ترتیب برابر با ۲۰۰۰ و ۱۵۰۰ µm در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی CFD مشاهده می‌شود که در خروجی گاز جداساز سطحی طراحی‌شده با ضریب لاغری ۴/۵ حداکثر قطر قطرات مایع خروجی برابر با ۱۰۲۸ µm می‌باشد. در جدول ۴ نتایج شبیه‌سازی CFD برای جداسازهای طراحی‌شده به‌صورت خلاصه نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود روش نوین ارائه‌شده در این پژوهش قادر است که به‌منظور استفاده‌های سرچاهی و میدانی ابعاد طراحی جداساز سطحی گاز-مایع را با دقت ۲/۸٪ تعیین کند. به‌طوری‌که در طراحی جداساز سطحی گاز-مایع حداکثر قطر مایع خروجی برابر با ۱۰۰۰ µm در نظر گرفته شد. با استفاده از روش نوین ترکیبی ارائه شده در این پژوهش، از خروجی گاز جداساز طراحی شده قطراتی با حداکثر قطر برابر با ۱۰۲۸ µm خارج شدند که حداکثر تعداد قطرات خارج شده طبق نتایج CFD برابر با ۲۰ عدد و کسر حجمی مایع در جریان گاز خروجی از جداساز برابر با ۰/۰۰۸٪ بوده و راندمان جداسازی برابر با ۹۹/۸٪ است.

جدول ۴ نتایج بررسی عملکردی شبیه‌سازی CFD جداساز سرچاهی دوفازی گاز- مایع

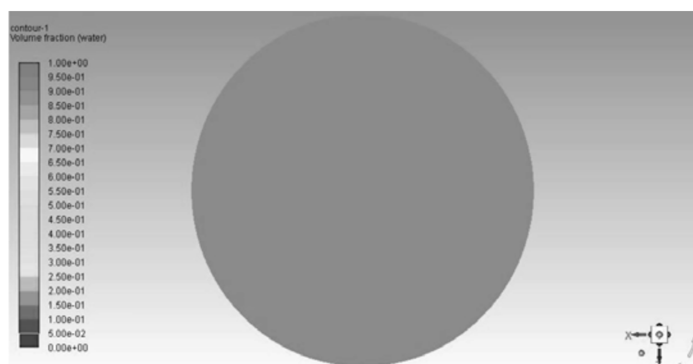
جداساز	نسبت لاغری	حداکثر قطر قطره در خروجی گاز (µm)	راندمان جداسازی (٪)	تعداد قطره‌های مایع در خروجی گاز	کسرحجمی مایع در خروجی گاز (٪)	کسر حجمی مایع در ورودی
طراحی شده	۴/۵	۱۰۲۸	۹۹/۸	۲۰	۰/۰۰۸	۴/۴

1. Seam-To-Seam Length

پس با این حساب برای چاه ارائه شده در میدان گاز میعانی پارس جنوبی واقع در فاز ۹، جداساز بهینه طراحی شده دارای m ۲ قطر و طول مؤثر برابر با m ۷ و ضریب لاغری بهینه ۴/۵ می‌باشد که در محدوده استاندارد نیز می‌باشد [۱۵]. در شکل ۱۱ کانتور کسرحجمی فاز مایع در جداساز دوفازی سطحی A نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ از نتایج شبیه‌سازی CFD نشان داده شده است، جداساز دوفازی سطحی که با استفاده از بررسی‌های تجربی و آنالیز ابعادی طراحی شد، دارای عملکرد بسیار قابل توجهی در جداسازی فازهای گاز و مایع دارد و در سطح مایع نیز موجهای بلند که نشان‌دهنده پدیده حمل‌مجدد قطرات مایع توسط فاز گاز باشد مشاهده نمی‌شود. در شکل ۱۲ کانتور کسرحجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز نشان داده شده است به‌طوری‌که کسرحجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز با استفاده از شبیه‌سازی CFD برابر با ۰/۰۰۸٪ تعیین می‌شود. با توجه به شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که کسرحجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز سطحی طراحی شده برابر با ۰/۰۰۸٪ است. با توجه به جدول ۴ که از نتایج شبیه‌سازی CFD جداساز سطحی طراحی‌شده به‌دست آمده است حداکثر قطر قطرات مایع در خروجی گاز برابر با μm ۱۰۲۸ می‌باشد که در آنالیز ابعادی نیز حداکثر قطر قطرات مایع در خروجی گاز جداساز برابر با μm ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد که با مقایسه حداکثر قطر قطرات در خروجی گاز جداساز مشاهده می‌شود که روش نوین ارائه شده برای طراحی جداسازهای سطحی دوفازی گاز-مایع قادر است با دقت ۲/۸٪ ابعاد جداساز سطحی گاز-مایع را تعیین کند.



شکل ۱۱ کانتور کسر حجمی فاز مایع در جداساز دوفازی سطحی طراحی شده



شکل ۱۲ کانتور سرحجمی فاز مایع در خروجی گاز جداساز دوفازی سطحی طراحی شده

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۹-۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا مروری بر روش‌های نیمه‌تجربی موجود برای طراحی جداسازهای سرچاهی انجام شد و سپس با طراحی و ساخت واحد سامانه آزمایشگاهی و انجام بررسی‌های آزمایشگاهی مشاهده شد که این روش‌های نیمه‌تجربی به‌دلیل فرضیات ساده‌کننده که در این روش‌ها وجود دارد، خطای قابل توجهی دارند. پس از انجام بررسی‌های آزمایشگاهی، مدل شبیه‌سازی CFD با استفاده از داده‌های تجربی با متوسط خطای نسبی برابر با ۷٪ اعتبارسنجی شد. سپس گروه‌های بی‌بعدی که در آنها تمامی پارامترهای مؤثر بر فرآیند جداسازی دخیل هستند ارائه گردید و با استفاده از آنها ابعاد جداساز سطحی برای یکی از چاه‌های تولیدی میدان گاز میعانی پارس جنوبی فاز ۹ تعیین شد. در ادامه با استفاده از مدل شبیه‌سازی CFD که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده بود، جداساز سطحی طراحی‌شده شبیه‌سازی شد و با دقت ۲/۸٪ توزیع قطرات مایع از خروجی گاز جداساز سطحی را پیش‌بینی نمود. از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

- بررسی روش نیمه‌تجربی آرنولد- استوارت به‌منظور طراحی جداسازهای سطحی
- طراحی و ساخت واحد سامانه آزمایشگاهی آزمایش جداسازهای دوفازی گاز-مایع
- ارائه بهترین مدل شبیه‌سازی CFD به‌منظور شبیه‌سازی جداسازهای دوفازی آزمایشگاهی و میدانی
- ارائه گروه‌های بی‌بعد جدید به‌منظور استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای طراحی ابعاد جداساز سطحی
- ارائه روش ترکیبی جدید به‌منظور طراحی ابعاد جداسازهای سطحی با دقت ۲/۸٪

علائم و نشانه‌ها

D: قطر جداساز (m)

ρ_g: چگالی گاز (kg/m^3)

L_{eff}: طول موثر جداساز (m)

ρ_l: چگالی مایع (kg/m^3)

T: دمای جداساز (°C)

C_D: ضریب درگ (----)

Z: ضریب تراکم گاز (----)

d_m: قطر قطرات مایع (µm)

P: فشار جداساز (Pa)

Q_g: دبی حجمی گاز (m^3/h)

v_t: سرعت حد (m/s)

Q_l: دبی حجمی مایع (m^3/h)

S: نسبت لغزش (----)

x: کیفیت گاز (----)

σ: تنش سطحی دوفازی (N/m)

k: خمیدگی ناحیه ای بین فازی (----)

δ: تابع تغییر دیراک (----)

n: بردار عمودی سطح (----)

R: قطر حباب گاز (m)

α: کسرحجمی گاز (----)

v: سرعت (m/s)

R_e: عدد رینولدز (----)

μ: ویسکوزیته (Pa.s)

t_r: زمان ماند (s)

g: شتاب گرانشی (m/s^2)

β: زاویه خط مماس بر سطح تماس دوفاز (°)

m_g: دبی جرمی گاز (kg/h)

m_l: دبی جرمی مایع (kg/h)

ρ_c: چگالی فاز پیوسته (kg/m^3)

ρ_d: چگالی فاز پراکنده (kg/m^3)

μ_c: ویسکوزیته فاز پیوسته (Pa.s)

μ_d: ویکوزیته فاز پراکنده (Pa.s)

D_p: قطر داخلی لوله (m)

v_c: سرعت سطحی فاز پیوسته (m/s)

Y_d: کسر جرمی قطرات با قطر بزرگتر از d_m (----)

مراجع

[1]. Souders M, Brown G G (1934) Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity, Industrial and Engineering Chemistry, 26, 1: 98-103, doi.org/10.1021/ie50289a025.
[2]. Chilingarian G V, Robertson J O, Kumar S (1987) Surface operations in petroleum production, I. Elsevier.
[3]. Monnery W D, Svrcek W Y (1994) Successfully specify three-phase separators, Chemical Engineering Progress, 90: 29-29.
[4].Guo B, William C, Ghalambor A (2007) petroleum production engineering, Elsevier Science and Technology Books.
[5]. Wilkinson D, Waldie B, Nor M M, Lee H Y (2000) Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators, Chemical Engineering Journal, 77, 3: 221-226, doi.org/10.1016/S1385-8947(99)00170-9.
[6]. Hansen E W (2001) Phenomenological modelling and simulation of fluid flow and separation behavior in offshore gravity separators. Asme-Publications-Pvp, 431: 23-30.
[7]. Pourahmadi Laleh A, Svrcek W Y, Monnery W D (2011) Computational fluid dynamics simulation of pilot-plant-scale two-phase separators, Chemical Engineering and Technology, 34, 2: 296-306, doi.org/10.1002/ceat.201000302.
[8]. Stewart M (2014) Surface Production Operations: Design of Gas-Handling Systems and Facilities (Vol. 2), Gulf Professional Publishing.
[9]. Ghaffarkhah A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Eslami H (2017) Application of CFD for designing conventional three phase oilfield separator, Egyptian Journal of Petroleum, 26, 2: 413-420, doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.06.003.
[10]. Acharya T, Casimiro L (2020) Evaluation of flow characteristics in an onshore horizontal separator using computational fluid dynamics, Journal of Ocean Engineering and Science, doi.org/10.1016/j.joes.2019.11.005.
[11]. Ahmed T, Russell P A, Hamad F, Gooneratne S (2019) Experimental analysis and computational-fluid-dynamics modeling of pilot-scale three-phase separators, SPE Production and Operations, doi.org/10.2118/197047-PA.
[12]. Frank M, Kamenicky R, Drikakis D, Thomas L, Ledin H, Wood T (2019) Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator. Energies, 12, 11: 2116, doi.org/10.3390/en12112116.
[13]. Ghaffarkhah A, Dijvejin Z A, Shahrabi M A, Moraveji M K, Mostofi M (2019) Coupling of CFD and semiempirical methods for designing three-phase condensate separator: case study and experimental validation, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 9, 1: 353-382.
[14]. Oshinowo L, Vilagines R (2019) Verification of a CFD-population balance model for crude oil separation efficiency in a three-phase separator–effect of emulsion rheology and droplet size distribution, In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/194834-MS.
[15]. Stewart M, Arnold K E (2011) Surface production operations, 1: Design of oil handling systems and facilities, Elsevier.
[16]. Manual F (2005) Manual and user guide of Fluent Software, Fluent Inc, 597.
[17]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD simulation of two-phase flow measurement using orifice flow meter, Journal of Petrolume Research, 29, 98-5: 108, 10.22078/PR.2019.3642.2711.
[18]. Frank, M. (2011). White, Fluid Mechanics, McGraw Hill.
[19]. Shoham O (2005) Mechanistic modeling of gas/liquid two-phase flow in pipes, 240-250, SPE, doi.org/10.2118/9781555631079.
[20]. API specifications 12J,seventh edition, October 1, (1989).

تعیین گونه‌های سنگی با هدف ارزیابی کیفیت مخزنی سازند داریان در چارچوب سکانس‌های رسوبی در یکی از میادین نفتی بخش شرقی خلیج فارس

محمدعلی صالحی*[1]، جواد سبحانی[2]، حمزه مهرابی[2] و سجاد کاظم شیرودی[3]
۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران
۲- گروه رسوب‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، ایران
۳- اداره زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۹

چکیده

سازند داریان به سن آپتین یکی از مهمترین افق‌های مخزنی تولیدی در زاگرس و خلیج فارس به شمار می‌رود. مطالعۀ حاضر بر پایۀ تلفیق نتایج به‌دست آمده از مطالعات پتروگرافی، مخزنی و پتروفیزیکی به منظور تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از روش‌های مرسوم و با هدف نهایی ارزیابی کیفیت مخزنی سازند داریان در یکی از میدان‌های بخش شرقی خلیج فارس انجام گرفته است. مطالعات پتروگرافی بر روی مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از این سازند در چاه‌های مورد مطالعه منجر به شناسایی نه ریزرخساره رسوبی شد که در پنج زیرمحیط حوضه، رمپ بیرونی، میانی و داخلی رسوب کرده‌اند. بر این اساس، محیط رسوب‌گذاری سازند داریان در میدان مورد مطالعه سکوی کربناته از نوع رمپ پیشنهاد شده است. همچنین عوارضی از قبیل انحلال، دولومیتی شدن، شکستگی، میکرایتی شدن، تراکم (مکانیکی و شیمیایی) و زیست آشفتگی به عنوان مهمترین فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شده است. بر مبنای داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، تعداد شش واحد جریان هیدرولیکی (روش نشان‌گر زون جریان)، چهار گونه سنگی وینلند و سه گونۀ سنگی لوسیا شناسایی گردید. برمبنای داده‌های تخلخل و تراوایی تخمین زده شده از داده‌های لاگ نیز، با استفاده از روش نشانگر زون جریان، تعداد پنج واحد جریان هیدرولیکی و بر مبنای نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز، تعداد شش زون مخزنی و غیرمخزنی (سدی و تله‌ای) شناسایی گردید. همچنین، با به‌کارگیری روش MRGC، تعداد هفت رخساره الکتریکی تفکیک گردید. مقایسه نتایج روش‌های مختلف استفاده شده در این مطالعه تشابه نسبتاً نزدیکی را نشان می‌دهند و کالیبراسیون آنها با مطالعات پتروگرافی حاکی از همخوانی نتایج با یکدیگر دارد. در یک نگاه کلی، کیفیت مخزنی سازند داریان در دسته رخساره‌ای HST که همراه با رخساره‌های دانه غالب فسیل‌دار و رخساره‌های باندستونی مربوط به کمربند رخساره‌ای رمپ داخلی هستند، بیشتر می‌باشد که می‌تواند منطقه هدف در راستای افزایش تولید و توسعه میادین در نظر گرفته شود. بر خلاف این، رخساره‌های گل غالب مربوط به کمربندهای رخساره‌ای حوضه و رمپ خارجی در دسته رخساره TST، واحدهای با کیفیت پایین سازند داریان را شامل می‌شوند.

کلمات کلیدی: گونه سنگی مخزنی، واحدهای جریانی هیدرولیکی، رخساره‌های الکتریکی، سازند داریان، خلیج فارس

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی ma.salehi@sci.ui.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4892.3187)

مقدمه

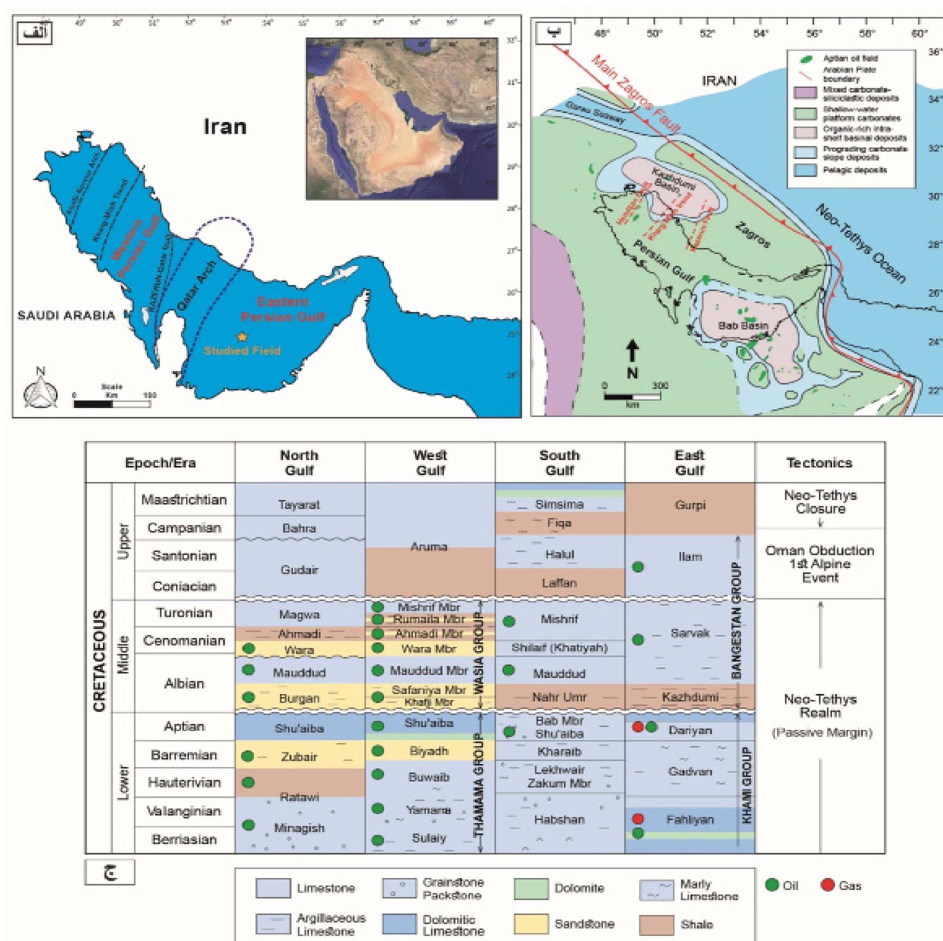
استفاده از مفهوم گونه‌های سنگی مخزنی[1] بهترین روش برای برقراری ارتباط بین داده‌های پتروفیزیکی و پارامترهای زمین‌شناسی می‌باشد. از همین رو، برای تخمین رفتار جریانی مخزن با استفاده از این مفهوم، داده‌های تک بعدی پتروفیزیکی با داده‌های سه‌بعدی پتروگرافی تلفیق می‌شوند [۱]. شناسایی و تعیین گونه‌های سنگی با هدف دسته‌بندی سنگ‌ها براساس ویژگی‌های مخزنی یکسان و متعاقباً رفتار دینامیکی تقریباً مشابه، ساخت مدل‌های سه بعدی مخزنی را امکان‌پذیر می‌کنند [۳ و ۲]. تفکیک گونه‌های سنگی یکی از مفیدترین مطالعات به منظور تحلیل و ارزیابی کیفیت مخزنی و گاهی زون‌بندی یک مخزن است چرا که گونه‌های سنگی از عوامل تأثیرگذار بر روی حجم نفت و گاز درجا هستند و به توانایی سنگ برای ذخیره‌سازی سیال (تخلخل) و انتقال آن (تراوایی) و نیز توزیع اندازه منافذ سنگ مرتبط می‌باشند [۴]. روش‌های مختلفی برای تعیین گونه‌های سنگی مخزن وجود دارد که با توجه به کمیت و کیفیت اطلاعات در دسترس، می‌توان از آنها استفاده نمود. به دلیل محدودیت در اندازه‌گیری پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مخزن، روشی برای دسته‌بندی انواع سنگ مناسب است که بتوان پارامترهای استاتیکی بیشتری را اندازه‌گیری کرد و با توجه به همبستگی اطلاعات، رفتار دینامیکی و اثرات سنگ و سیال بهتر در آن تعریف شود. از بین روش‌های موجود می‌توان به واحدهای جریان هیدرولیکی براساس نشانگر زون جریان، نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز و رخساره‌های الکتریکی اشاره کرد که روش‌های متداولی هستند که مبنای مطالعات بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند [۶ و ۵]. چینه‌نگاری سکانسی به‌عنوان یک چارچوب زیرسطحی در پیش‌بینی و ارائه توزیع چهاربعدی سنگ منشأ، مخزن و پوش سنگ مؤثر می‌باشد. با شناخت کامل عوارض رسوبی و دیاژنزی و قرار دادن آنها در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی، بررسی و پیش‌بینی خصوصیات مخزنی در فواصل بین چاهی امکان‌پذیر خواهد بود. توزیع سکانس‌ها در درون مخزن در درک توزیع واحدهای مخزنی و غیرمخزنی از اهمیت بسزایی برخوردار هستند. با مطالعه چینه‌نگاری سکانسی می‌توان تعیین کرد که کدام بخش از دسته‌های رخساره‌ای بیشترین پتانسیل مخزنی را خواهند داشت. از این‌رو، تفسیر چینه‌نگاری سکانسی نقش بسیار مهمی در اکتشاف و توسعه میادین نفتی ایفا می‌نمایند. سازند داریان به‌عنوان جوان‌ترین سازند گروه خامی در نقش سنگ هیدروکربوری و در مواردی با دارا بودن پتانسیل مخزنی حائز اهمیت است و یکی از مهم‌ترین سازندهای مخزنی در زاگرس و خلیج فارس به شمار می رود و با سنگ‌شناسی کربناته و ماهیت گل پشتیبان در مرکز خلیج فارس شناخته شده است [۹-۷]. قرار گرفتن سازند داریان در بین دو سازند کژدمی و گدوان که هر دو به عنوان سنگ منشأ، پوش‌سنگ‌های مهم معرفی شده‌اند بر اهمیت این ویژگی افزوده است [۱۰]. در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از روش‌های مرسوم، انواع گونه‌های سنگی مخزنی در سازند داریان در یکی از میادین بخش شرقی خلیج فارس تفکیک و توصیف شوند (شکل ۱- الف). در ادامه نتایج روش‌های مختلف با هم مقایسه گردند، و با کالیبراسیون نتایج روش‌های مختلف با آنچه که از مطالعات پتروگرافی به‌دست آمده است نقاط ضعف و قوت هر روش به‌طور جداگانه بیان گردد، تا بتوان از آنها جهت شناخت بهتر زون‌های مخزنی استفاده کرد.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

در کرتاسۀ پیشین قسمت شمال شرقی صفحۀ عربی (شامل خلیج فارس و زاگرس) به‌صورت یک حاشیۀ غیرفعال قاره‌ای در نیمکرۀ جنوبی (بین °۱۰ تا °۱۵ جنوب خط استوا) قرار داشته است [۱۲ و ۱۱].

1. Reservoir Rock Type (RRT)

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۳۹-۲۰



شکل ۱ الف) نمایش موقعیت میدان مورد مطالعه در جنوب ایران، قسمت شرقی خلیج فارس، همراه با عناصر ساختاری اصلی مانند گسل‌های اصلی، بلندی‌ها و فرورفتگی‌ها (اقتباس با تغییراتی از [۱۹] ب) جغرافیای دیرینه صفحه عربی در آپتین پیشین [۷] ج) چینه‌شناسی کرتاسه در خلیج فارس و نواحی مجاور آن و نیز تحولات زمین‌ساختی بزرگ صفحهٔ عربی (اقتباس از [۷])

در این زمان، این بخش از صفحهٔ عربی شرایط زمین‌ساختی ویژه‌ای را متحمل شده است، به‌طوری‌که شکل حوضهٔ رسوبی تحت تأثیر حرارت‌های تفریقی، حرکات هالوکینتیک (مرتبط با حرکت نمک) مربوط به‌سری هرمز و فعالیت مجدد گسل‌های پی‌سنگی کششی (نظیر گسل‌های خارگ-میش و هندیجان) قرار گرفته و این امر موجب تشکیل بالاآمدگی‌ها و حوضه‌های درون‌شلفی شده است [۱۵-۱۳]. در کرتاسهٔ پیشین، محیط رسوبی عمومی خلیج فارس یک سکوی کربناتهٔ کم عمق بوده که دو حوضهٔ درون‌شلفی باب[1] و کژدمی به‌ترتیب در جنوب تا جنوب شرق و شمال غرب آن جای داشته‌اند [۱۵ و ۱۱]. توالی‌های کربناتهٔ سازند داریان برروی این سکوهای کم عمق در طول آپتین توسعه یافته‌اند [۱۸-۱۶]. این سازند که جوان‌ترین سازند گروه خامی می‌باشد، در محل برش الگو شامل سنگ آهک قهوه‌ای تا خاکستری رنگ، ضخیم لایه تا توده‌ای خشن و برجسته متعلق به محیط دریایی کم عمق است که در آن اربیتولین به فراوانی یافت می‌شود [۱۰]. در غرب خلیج فارس، یک واحد شیلی/ مارنی که زبانهٔ کژدمی نامیده می‌شود، سازند داریان را به دو قسمت پایینی و بالایی تقسیم می‌کند. در خلیج فارس، سازند داریان در قسمت‌های تحتانی و فوقانی، به‌ترتیب توسط دو واحد سنگ چینه‌ای معروف به

1. Bab

سـازندهای گـدوان (مـارن و آهـک مارنـی) و کژدمـی (شـیل) محـدود می‌شـود. به‌طوری‌کـه به‌صـورت پیوسـته بـرروی سـازند گـدوان و بـا مـرز ناپیوسـته در زیـر سـازند کژدمـی قـرار گرفتـه اسـت (شـکل ۱- ب). در بخش‌هـای عربـی خلیـج فـارس (یعنـی قطر، عمـان و امـارات متحـده عربـی)، توالـی رسـوبی آپتیـن تحـت عنـوان سـازند شـعیبا شـناخته می‌شـود. در ایـن نواحـی، ایــن ســازند بــه دلیــل وجــود نهشــته‌های حوضــه‌ای درون‌شـلفی بـاب بـه دو بخـش پاییـن و بـالا تقسـیم می‌شـود [۲۰]. سـازند داریـان در ایـران و هـم ارزهـای چینه‌شناسـی آن در زیـر یـک ناپیوسـتگی قابـل ردیابی ناحیـه‌ای قـرار دارنـد کـه به‌عنـوان ناپیوسـتگی آپتیـن پسـین شـناخته می‌شـود (شـکل ۱- ج). میـدان مـورد مطالعـه در ایـن پژوهـش در بخـش شـرقی خلیـج فـارس واقـع شـده اسـت کـه میـدان مشـترک نفتـی بیـن ایـران و امـارات می‌باشـد. نفـت تولیـدی ایـن میـدان در سـه مخـزن کربناتـهٔ سـورمه بالایـی، داریـان و سـروک بالایـی بـه سـن ژوراسـیک بالایـی تـا کرتاسـه میانـی قـرار دارد و سـازند داریـان مهمتریـن افـق مخزنـی آن اسـت [۲۱]. در ایـن میـدان، سـازند داریـان قابـل تقسـیم بـه چهـار واحـد شـامل کربناتـهٔ زیریـن (زون ۴، بـه ضخامـت متوسـط حـدود ۲۷ m)، سـنگ آهـک آرژیلیتـی میانـی (زون ۳، زبانـهٔ کژدمـی یـا بـاب بـه ضخامـت متوسـط حـدود ۳۸ m)، کربناتـهٔ بالایـی (زون ۲، بـه ضخامـت متوسـط حـدود ۳۶ m) و سـنگ آهـک آرژیلیتـی فوقانـی (زون ۱، بـه ضخامـت متوسـط حـدود ۹ m) می‌باشـد (شـکل ۲). البتـه واحـد سـنگ آهـک آرژیلیتـی فوقانـی بـه سـمت شـمال میـدان بـه تدریـج نـازک شـده و نهایتـاً از بیـن مـی‌رود.

داده‌ها و روش مطالعه

ایـن مطالعـه بـر مبنـای داده‌هـای شـش چـاه از یـک میـدان نفتـی واقـع در بخـش شـرقی خلیـج فـارس انجـام شـده اسـت. بـه منظـور دسـتیابی بـه اهـداف ایـن مطالعـه، از اطلاعاتـی نظیـر مغزه‌هـا و خرده‌هـای حفـاری، نمودارهـای پتروفیزیکـی و داده‌هـای تخلخـل و تراوایـی مغـزه اسـتفاده شـده اسـت.

پتروگرافی

در بخـش مطالعـهٔ پتروگرافـی بـه منظـور تعییـن رخسـاره‌های رسـوبی و فرآیندهـای دیاژنـزی در سـازند داریـان، تعـداد ۲۸۰ مقطـع نـازک میکروسـکوپی تهیـه شـده از مغزه‌هـا (جمعـاً بـه متـراژ ۲۳۵ m) و خرده‌هـای حفـاری مـورد اسـتفاده قـرار گرفته‌انـد. نام‌گـذاری رخسـاره‌ها بـا اسـتفاده از روش دانهـام [۲۲] و امـری و کلـوان [۲۳] انجـام شـده اسـت. سـپس رخسـاره‌های تعییـن شـده بـا رخسـاره‌های اسـتاندارد فلـوگل [۲۴] مطابقـت داده شـده‌اند. بـه منظـور تعییـن سـکانس‌های رسـوبی از روش پیشرونده-پسـرونده[1] اسـتفاده شـده اسـت، زیـرا تشـخیص دسـته رخسـاره‌های LST و FRST امـکان پذیـر نبـوده اسـت [۲۵-۲۷] بـرای شناسـایی و تعییـن گونه‌هـای سـنگی مخزنـی در سـازند داریـان، براسـاس داده‌هـای تخلخـل و تراوایـی مغـزه بـه تعـداد ۴۸ نمونـه پـلاگ مغـزه و همچنیـن داده‌هـای تخلخـل و تراوایـی تخمینـی از روی نمودارهـای چاه‌پیمایـی، از روش‌هـای تعییـن واحدهـای جریـان هیدرولیکـی بـا اسـتفاده از روش نشـانگر زون جریـان، نمـودار چینـه‌ای اصـلاح شـدهٔ لورنـز [۲۸]، روش محاسـباتی شـعاع گلوگاه حفـرات بـا اسـتفاده از معادلـه وینلنـد [۲۹] و کلاس‌هـای پتروفیزیکـی لوسـیا [۳۰] اسـتفاده شـده اسـت.

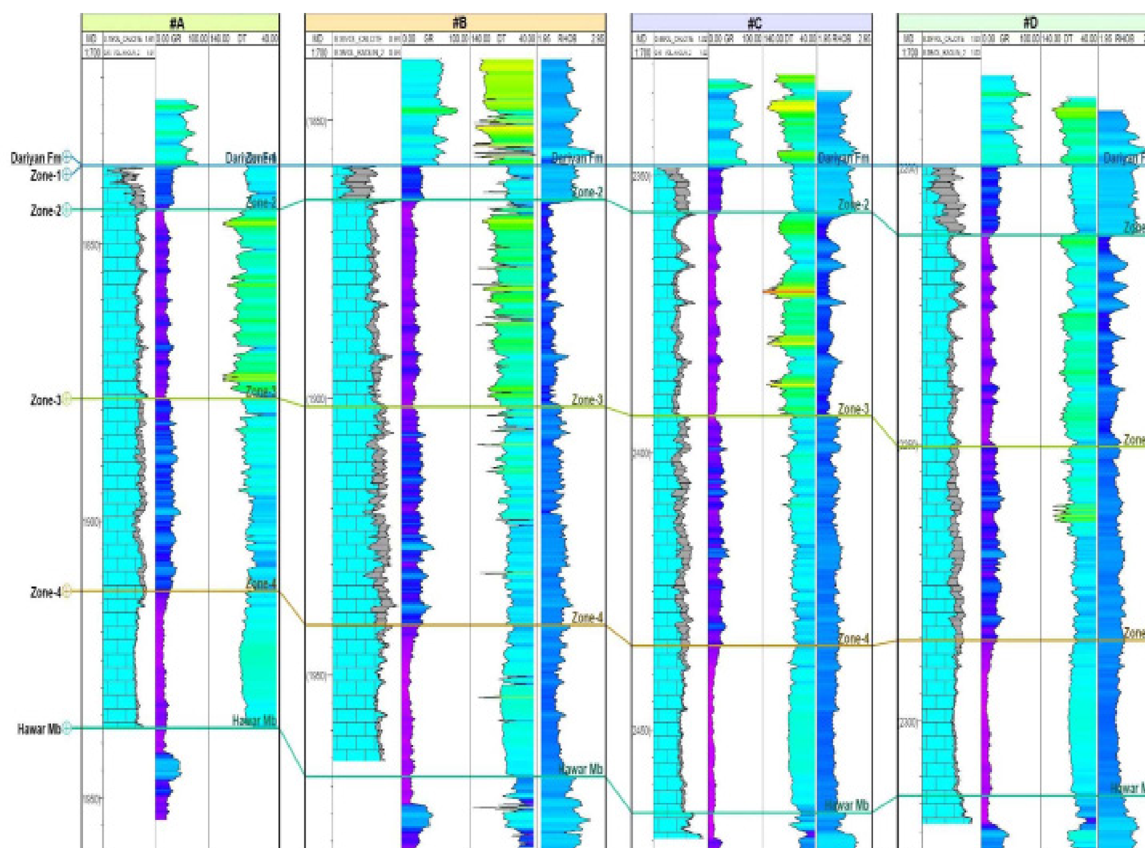
واحدهای جریانی هیدرولیکی

روش تعییـن واحدهـای جریـان هیدرولیکـی بـه وسـیلهٔ نشـانگر زون جریـان ابتـدا توسـط آمافولـه [۳۱]. مطـرح شـده و سـپس توسـط سـایر محققـان توسـعه یافتـه اسـت. در ایـن روش هـر واحـد جریـان هیدرولیکـی (HFU) براسـاس نشـانگر زون جریانـی (FZI) مشـخص می‌شـود کـه می‌توانـد برحسـب روابـط بیـن حجـم فضـای خالـی (ε) و توزیـع هندسـی فضـای خالـی (کـه به‌صـورت شـاخص کیفیـت مخزنـی کمـی می‌شـود) به‌صـورت زیـر محاسـبه شـود:

$$Log\ RQI = Log\ FZI + Log\ \varepsilon \qquad (۱)$$

1. Transgresssive-Regressive

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۳۹-۲۰



شکل ۲ تطابق سازند داریان و واحدهای سنگ چینه‌ای آن در بین چاه‌های مورد مطالعه

که در آن ε یا PMR به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\varepsilon = \frac{\varphi}{1-\varphi} \quad (۲)$$

مقادیر FZI و RQI می‌توانند با استفاده از روابط زیر محاسبه شوند:

$$RQI = 0.0314\sqrt{\frac{k}{\varphi}} \quad (۳)$$

$$FZI = \frac{RQI}{\varphi} \quad (۴)$$

گونه‌های سنگی وینلند

روش وینلند روشی است که براساس آن شعاع گلوگاه در شرایطی که ۳۵٪ منافذ توسط جیوه اشباع گردد، از طریق نمودارهای فشار موئینه محاسبه می‌شود. روش وینلند گونه‌های سنگی را ارائه می‌دهد که منعکس‌کنندۀ هر دو فابریک رسوبی و دیاژنزی است. این واحدهای جریانی، زون‌های با نسبت تخلخل به تراوایی ثابت را ارائه می‌دهد و ابزاری مناسب جهت تعیین زون‌های مخزنی از غیرمخزنی می‌باشد [۲۸]. کلودزی [۳۲] نتایج روش وینلند را به‌صورت رابطه زیر منتشر کرد:

$$Log\ R_{35} = 0.732 + 0.588 * Log(k) - 0.864 * Log(\varphi) \quad (۵)$$

در این رابطه R35، شعاع گلوگاه منافذ در اشباع ۳۵٪ جیوه (برحسب میکرون)، K، تراوایی (برحسب میلی‌دارسی)، و ϕ، تخلخل (برحسب درصد) می‌باشد.

زون‌بندی مخزنی به روش لورنز

نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز (SMLP) یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به حداقل تعداد واحدهای جریانی در مخزن است [۳۳ و ۱]. این نمودار براساس رسم ظرفیت تجمعی جریانی در مقابل ظرفیت تجمعی ذخیره، با حفظ ترتیب چینه‌شناسی آنها می‌باشد. نقاط عطف در نمودار SMLP، بیانگر تغییرات در خواص مخزنی محیط متخلخل است. روش کار تعیین واحدهای جریانی به‌روش لورنز بدین صورت است که ابتدا تخلخل و تراوایی پیوسته (طول به طول) و نسبت تراوایی به تخلخل (K/φ) متناسب در یک نظم چینه‌شناسی

مرتب می‌شوند [۱]. سپس، حاصل‌ضرب تراوایی در عمق مربوطه (k*h) و تخلخل در عمق مربوطه (ϕ*h) محاسبه می‌گردد. داده‌های به‌دست آمده به‌ترتیب با عنوان ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره نامیده می‌شوند. برای ترسیم نمودار لورنز لازم است دو پارامتر ظرفیت تجمعی جریان و ظرفیت تجمعی ذخیره به‌صورت زیر محاسبه شوند:

(۶)

$$\varphi h_{cum} = \varphi_1 \left(h_1 - h_2 \right) / \varphi h_{Total} + \varphi_1 \left(h_1 - h_2 \right) / \varphi h_{Total} + \ldots + \varphi_n \left(h_n - h_n \right) / \varphi h_{Total}$$

(۷)

$$kh_{cum} = k_{-1} \left(h_1 - h_2 \right) / kh_{Total} + \varphi_1 \left(h_1 - h_2 \right) / kh_{Total} + \ldots + k_n \left(h_n - h_n \right) / kh_{Total}$$

کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا

لوسیا و همکاران [۳۴] نموداری را برای تعیین گونه‌های سنگی و تخمین تراوایی مخازن کربناته پیشنهاد دادند که در محور افقی آن تخلخل بین دانه‌ای و در محور عمودی آن تراوایی قرار دارد. با پیاده نمودن داده‌های تخلخل بین دانه‌ای و تراوایی برای هر مخزن کربناته، می‌توان کلاس‌های پتروفیزیکی آن را به‌دست آورد. همچنین با پیاده نمودن داده‌های تخلخل بین دانه‌ای و تراوایی برای هر مخزن کربناته، می‌توان عدد فابریک سنگ را به‌دست آورد که با به‌دست آوردن آن می‌توان تراوایی را محاسبه نمود [۳۴].

رخساره‌های الکتریکی

مفهوم رخسارۀ الکتریکی یک روش برای دسته‌بندی سنگ‌ها (براساس خصوصیات فیزیکی و محتوای سیال آنها) به‌کمک نمودارهای چاه‌پیمایی است که می‌تواند نشان دهندۀ تغییر ویژگی‌های زمین‌شناسی (رسوبی و دیاژنزی) مخزن باشد؛ به ویژه در مواردی که مغزه در دسترس نباشد [۳۵]. به منظور شناسایی و تعیین گونه‌های سنگی مخزنی در سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه، براساس داده‌های نمودارهای پتروفیزیکی از قبیل گاما (GR)، صوت (DT)، نوترون (NPHI) و مقاومت (نظیر ILD, MLL) از مفهوم رخسارۀ الکتریکی براساس روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه نمودار[۱] در نرم‌افزار ژئولاگ استفاده شد (برای مطالعه بیشتر رجوع شود به [۳۶]. در روش MRGC که تلفیقی از هوش مصنوعی و خوشه‌بندی سلسله مراتبی می‌باشد، به طور خودکار تعداد بهینۀ خوشه‌ها استخراج می‌گردد. این روش از پارامترهایی به نام نمایندگی هسته[۲] و شاخص همسایگی[۳] استفاده می‌کند.

نتایج

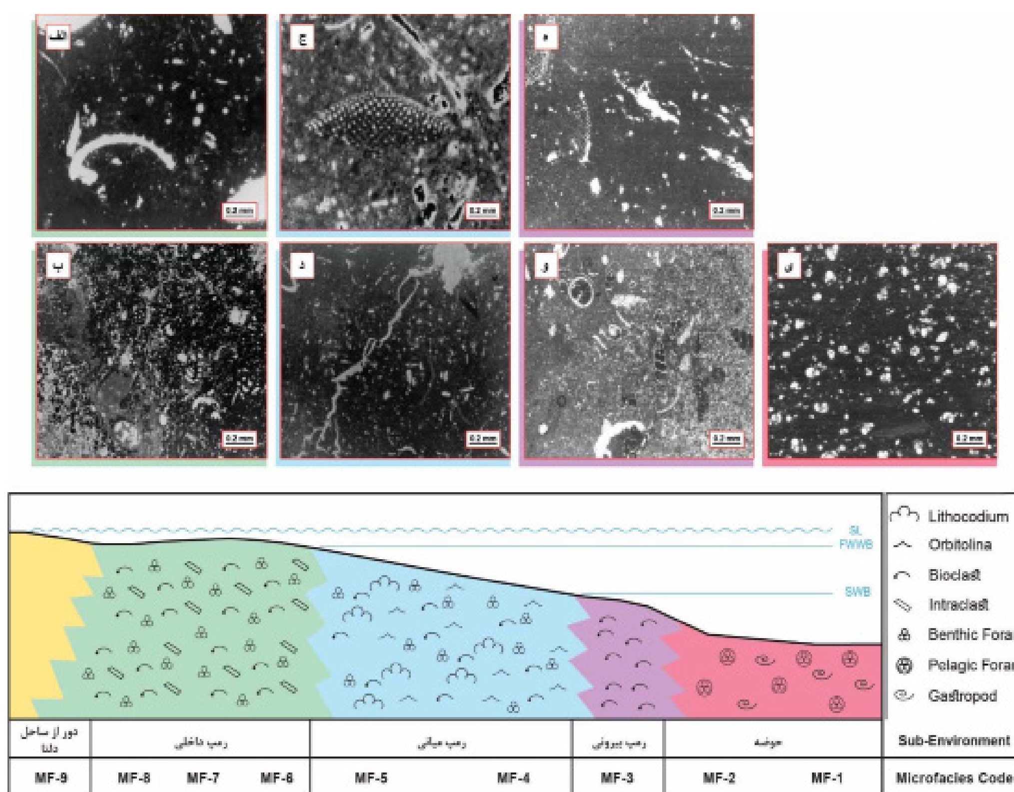
رخساره‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی

مطالعه پتروگرافی مقاطع نازک سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه منجر به شناخت تعداد ۹ رخسارۀ رسوبی گردیده است که در زیرمحیط‌های حوضه، رمپ بیرونی، رمپ میانی و رمپ درونی نهشته شده‌اند [۳۸ – ۳۷ و ۷] (جدول ۱، شکل ۳). با توجه به اینکه رخساره‌های شناسایی شده به همراه زیرمحیط‌های مربوطه در چاه‌های مورد مطالعه قبلاً توسط مهرابی و همکاران [۱۹] به‌طور مفصل شرح داده شده‌اند. از این‌رو، به منظور جلوگیری از تکرار مطالب و کارآمدتر کردن نتایج مطالعه، از توصیف و تفسیر رخساره‌ها چشم پوشی شد و خلاصه اطلاعات مربوط به ریزرخساره‌ها در جدول ۱ و تصاویر میکروسکوپی آنها در شکل ۳ ارائه شده است. به طور کلی به نظر می‌رسد نهشته‌های کربناته سازند داریان در یک محیط کربناته وسیع کم عمق با شیب خیلی کم شبیه به یک محیط رمپ کربناته رسوب‌گذاری کرده‌اند. رخساره‌ها و محیط رسوبی این سازند در مقیاس ناحیه‌ای نیز به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفته است و محیط رسوبی به‌صورت پلتفرم کربناته رمپ در نظر گرفته شده است که حوضه درون شلفی باب را در بخش شرقی خلیج فارس در بر گرفته است [۱۹].

1. MRGC
2. KRI
3. NI

جدول ۱ ریزرخساره‌های رسوبی شناسایی‌شده در سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه

کد ریزرخساره	نام ریزرخساره	زیرمحیط رسوبی	فرآیندهای دیاژنزی
MF-1	مادستون تا وکستون حاوی فرامینیفرهای پلاژیک	حوضه	میکرایتی شدن، دولومیتی شدن
MF-2	وکستون حاوی گاستروپودهای پلاژیک		میکرایتی شدن، دولومیتی شدن، زیست آشفتگی، تراکم شیمیایی
MF-3	مادستون تا وکستون بایوکلستدار	رمپ بیرونی	میکرایتی شدن، دولومیتی شدن، زیست آشفتگی، تراکم شیمیایی
MF-4	مادستون تا وکستون اربیتولین و بایوکلستدار	رمپ میانی	میکرایتی شدن، دولومیتی شدن، زیست آشفتگی، تراکم شیمیایی
MF-5	فلوتستون لیتوکودیوم و فرامینیفرا		میکرایتی شدن، انحلال
MF-6	باندستون	رمپ داخلی (لاگون)	میکرایتی شدن، انحلال
MF-7	پکستون تا وکستون فرامینیفر و اینتراکلستدار		میکرایتی شدن، دولومیتی شدن، زیست آشفتگی، تراکم شیمیایی
MF-8	وکستون تا پکستون بایوکلست مختلط و ماس‌های		تراکم، شکستگی، زیست آشفتگی
MF-9	مارن		زیست آشفتگی



شکل ۳ مدل شماتیک محیط رسوبی سازند داریان در میدان مورد مطالعه و تصاویر میکروسکوپی رخساره‌های رسوبی در هر کمربند رخساره‌ای الف و ب) تصاویر رخساره‌ای کمربند رخساره‌ای رمپ داخلی، ج و د) تصاویر رخساره‌ای کمربند رخساره‌ای رمپ میانی، ه و و) تصاویر رخساره‌ای کمربند رخساره‌ای رمپ بیرونی و ی: تصاویر رخساره‌ای کمربند رخساره‌ای حوضه)

از آنجایی‌که فرآیندهای دیاژنزی نقش مهمی در تعیین کیفیت مخزنی نهایی توالی‌های کربناته ایفا می‌نمایند، فرآیندهای دیاژنزی در سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه بررسی شده‌اند. مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی در این سازند شامل انحلال، دولومیتی شدن، شکستگی، میکرایتی شدن، تراکم (مکانیکی و شیمیایی) و زیست آشفتگی می‌باشند (جدول ۱).

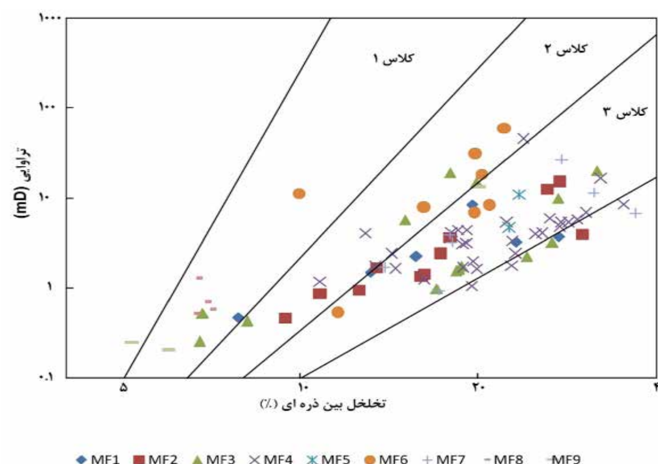
گونه‌های سنگی مخزنی

کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا

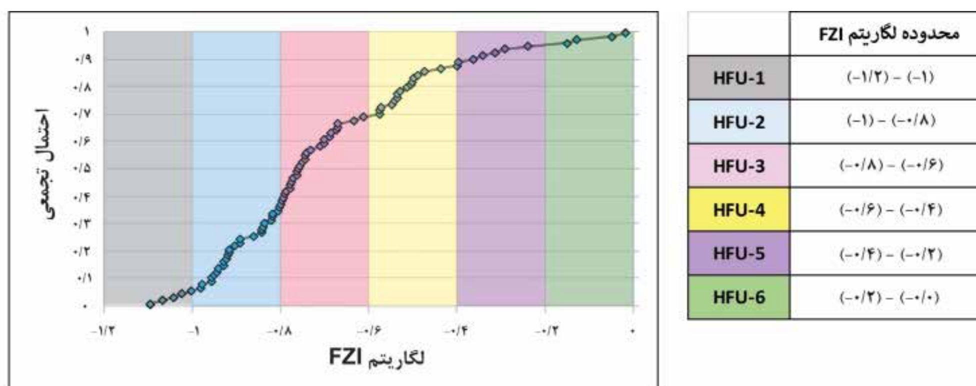
در روش لوسیا، به منظور تعیین گونه‌های سنگی با برقراری ارتباط بین رخساره‌های شناسایی شده در سازند داریان با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌ها برروی نمودار لوسیا ترسیم گردیده‌اند (شکل ۴) [۳۹]. در رسم داده‌ها از تخلخل کل به‌دست آمده از مغزه به‌جای تخلخل بین ذره‌ای استفاده شده است. بر این اساس، با تطبیق رخساره‌های شناسایی شده با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا، سه گونه سنگی در بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه شناسایی شد (شکل ۴). با توجه به نمودار لوسیا، رخساره‌های مربوط به کمربند رخساره‌ای پهنه جزرومدی (MF-8 و MF-9) در ردهٔ یک و رخساره‌های مربوط به کمربند رخساره‌ای رمپ میانی و خارجی در ردهٔ دو و سه قرار گرفته‌اند.

واحدهای جریانی هیدرولیکی

در روش نشانگر زون جریان (FZI)، با استفاده از رسم نمودار چگالی تجمعی برای تعیین تعداد بهینهٔ واحدهای جریانی برای بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه، تعداد شش واحد جریان هیدرولیکی در این چاه‌ها شناسایی گردید. شاخص کیفیت مخزنی از HFU-1 به‌سمت HFU-6 افزایش می‌یابد (شکل‌های ۵ تا ۷). در این مطالعه همچنین به منظور تعیین واحدهای جریانی از داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده شده است. به جهت تعیین واحدهای جریانی بر مبنای داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی از روی نمودارهای چاه‌پیمایی از روش نشانگر زون جریان (FZI) و نمودار چینه‌ای اصلاح شدهٔ لورنز (SMLP) استفاده شده است. محاسبات برای به‌دست آوردن پارامترهای مورد نظر، همانند محاسبات انجام شده برای داده‌های تخلخل-تراوایی مغزه صورت گرفته است. در ادامه نمودار تجمعی احتمال نرمال مقادیر FZI در مقابل Z رسم گردیده است. ترسیم این نمودار روش مناسبی برای تعیین تعداد بهینه واحدهای جریانی است [۴۰]. تعداد نقاط انحراف یا شکست، بیانگر تعداد واحدهای جریانی خواهد بود.

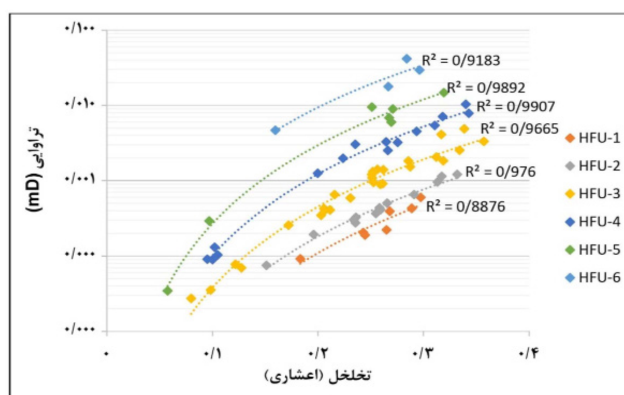


شکل ۴ نمودار تخلخل در برابر تراوایی نمونه‌های سازند داریان در یکی از چاه‌های مورد مطالعه در نمودار پتروفیزیکی لوسیا که براساس آن سه محدوده پتروفیزیکی مجزا مشخص شده است

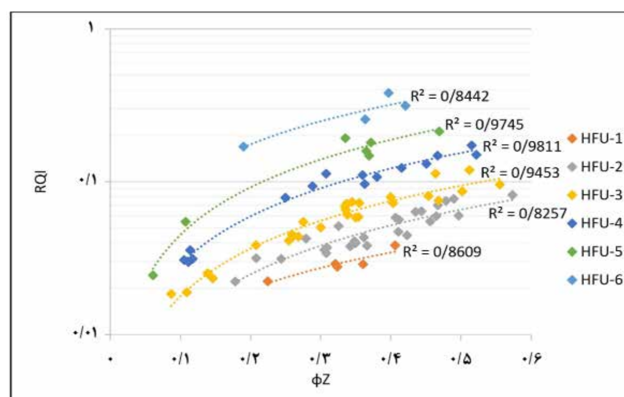


	محدوده لگاریتم FZI
HFU-1	(-۱/۲) - (-۱)
HFU-2	(-۱) - (-۰/۸)
HFU-3	(-۰/۸) - (-۰/۶)
HFU-4	(-۰/۶) - (-۰/۴)
HFU-5	(-۰/۴) - (-۰/۲)
HFU-6	(-۰/۲) - (-۰/۰)

شکل ۵ نمودار چگالی تجمعی به‌منظور تعیین دامنه تغییرات مقادیر لگاریتم FZI و مشخص نمودن تعداد بهینه واحدهای جریان هیدرولیکی در روش نشان‌گر زون جریان



شکل ۶ واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص شده از روش نشان‌گر زون جریان براساس رابطه تخلخل و تراوایی

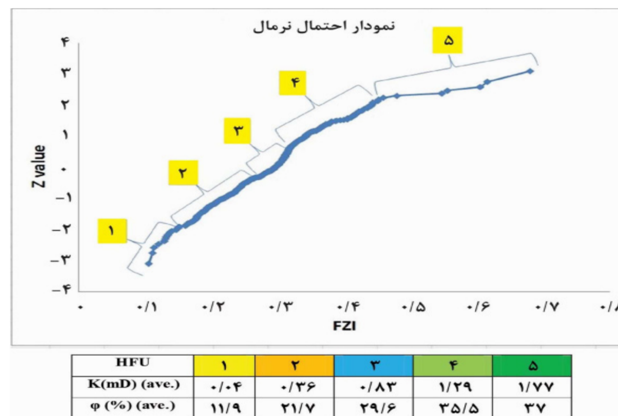


شکل ۷ نمودار شاخص کیفیت مخزنی (RQI) در برابر تخلخل نرمال شده (ΦZ) برای واحدهای جریان هیدرولیکی شناسایی شده

نمودار تجمعی احتمال نرمال بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه، وجود پنج شیب عمده را نشان می‌دهد که نشان از وجود پنج واحد جریانی مجزا از هم در این سازند است. از واحدهای جریانی ۱ به ۵ میزان تراوایی افزایش یافته و واحد جریانی ۵ دارای بهترین کیفیت مخزنی در سازند داریان است (شکل ۸).

روش وینلند

براساس رابطه وینلند، واحدهای جریانی در اشباع جیوه ۳۵٪ برای بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه تعیین شد.



HFU	۱	۲	۳	۴	۵
K(mD) (ave.)	۰/۰۴	۰/۳۶	۰/۸۳	۱/۲۹	۱/۷۷
φ (%) (ave.)	۱۱/۹	۲۱/۷	۲۹/۶	۳۵/۵	۳۷

شکل ۸ واحدهای جریانی تفکیک شده به‌روش FZI براساس داده‌های تخمینی به‌همراه مقادیر میانگین تراوایی و تخلخل در واحدهای جریانی تفکیک شده

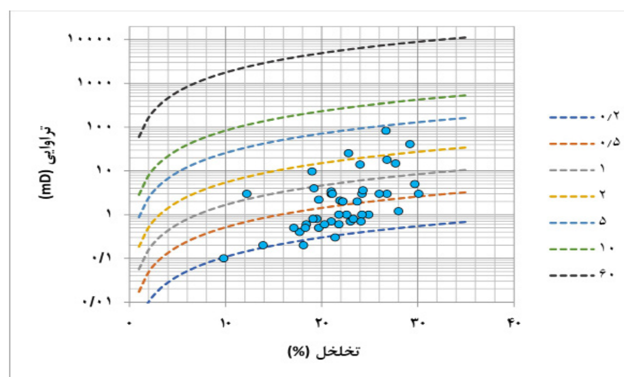
بدین ترتیب چهار واحد جریانی تفکیک گردید که عبارت است از: واحد جریانی یک: واحدهای با منافذ کوچکتر از µm ۰/۵، واحد جریانی دو: واحدهای با منافذ بین µm ۰/۵ تا ۱، واحد جریانی سه: واحدهای با منافذ بین µm ۱ تا ۲ و واحد جریانی چهار: واحدهای با منافذ بزرگتر از µm ۲ هستند (شکل ۹).

نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز

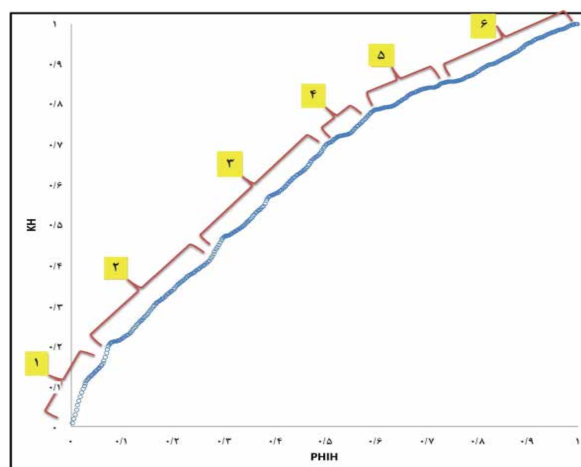
در این مطالعه پیوستگی داده‌های تخلخل و تراوایی حاصل از مغزه برای بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه بررسی گردید اما به دلیل پیوسته نبودن این اطلاعات در طول سازند، استفاده از روش نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز برمبنای این داده‌ها امکان‌پذیر نبود. با این حال، با استفاده از داده‌های پیوستۀ تخمینی تخلخل و تراوایی حاصل از نمودارهای چاه‌پیمایی، استفاده از روش نمودار چینه‌ای اصلاح شدۀ لورنز در این مطالعه فراهم گردید. بر این اساس، بر پایۀ نقاط شکست در منحنی ظرفیت ذخیره (PhiH) در برابر ظرفیت جریان (KH)، تعداد شش واحد جریانی برای بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه شناسایی گردید (شکل ۱۰). این شش واحد جریانی براساس میزان شیب منحنی و مقادیر ظرفیت جریان و ذخیره به چهار نوع واحد جریانی سرعت، مخزنی، تله‌ای و حدواسط تله‌ای/مخزنی تقسیم می‌گردند. ویژگی این واحدهای کلیدی بدین صورت است که واحدهای سرعت دارای ظرفیت جریان بالا و ظرفیت ذخیره بسیار پایین و واحدهای مخزنی دارای ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره بالایی، هستند. واحدهای تله‌ای نیز دارای ظرفیت ذخیره بالا اما ظرفیت جریان پایین می‌باشند. بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه دارای یک زون سرعت، دو زون مخزنی، یک زون تله‌ای و یک زون حدواسط تله‌ای/مخزنی می‌باشد.

رخساره‌های الکتریکی

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، در این مطالعه برای شناسایی و تفکیک رخساره‌های الکتریکی از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه نمودار برای بخش مطالعه شده از سازند داریان در میدان مورد مطالعه استفاده شده است. با استفاده از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی شامل گاما (GR)، صوت (DT)، نوترون (NPHI) و مقاومت (نظیر ILD, MLL) و با به‌کارگیری روش MRGC در نرم‌افزار ژئولاگ، مدلی با تعداد هفت رخسارۀ الکتریکی به‌عنوان بهینه‌ترین مدل انتخاب شد (جدول ۲). از نظر خواص مخزنی، از EFAC-1 به سمت EFAC-7 کیفیت مخزنی افزایش پیدا می‌کند. رخساره‌های الکتریکی EFAC-6 و EFAC-7، با مقادیر کم نمودارهای گاما و مقاومت و با مقادیر نسبتاً بالای نمودارهای نوترون و صوت مشخص می‌شوند.



شـکل ۹ شـعاع گلوگاه‌هـای منافـذ در اشـباع ۳۵٪ جیـوه مشـخص شـده از روش وینلنـد براسـاس رابطـهٔ تخلخـل و تراوایـی و مشـخص نمـودن تعـداد تفکیـک شـدهٔ واحدهـای جریانـی بـا اسـتفاده از ایـن روش

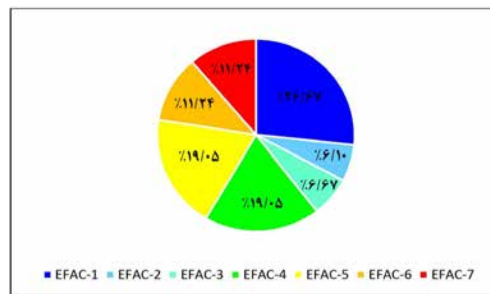


شکل ۱۰ نمودار ظرفیت تجمعی جریان در برابر ظرفیت تجمعی ذخیره و تعیین واحدهای جریانی بر پایهٔ نقاط شکست در منحنی

جــدول ۲ میانگیـن مقادیـر نمودارهـای چاه‌پیمایـی در هریـک از رخسـاره‌های الکتریکـی شناسـایی شـده به‌همـراه میـزان فراوانـی رخسـاره‌های الکتریکـی شناسـایی شـده

	Frequency (%)	DT (US/F)	GR (API)	ILD (OHM.M)	MLL (OHM.M)	NPHI (V/V)
EFAC-1	۲۶/۶۷	۹۵/۱۱	۱۵/۱۲	۱/۴۳	۱/۳۷	۰/۱۸
EFAC-2	۶/۱۰	۹۲/۹۲	۱۶/۴۸	۱/۰۳	۱/۱	۰/۲
EFAC-3	۶/۶۷	۸۸/۷۱	۲۳/۶۷	۱/۳۹	۱/۲۷	۰/۲۳
EFAC-4	۱۹/۰۵	۸۷/۵۶	۲۱/۲۲	۰/۸۳	۱/۲۳	۰/۱۹
EFAC-5	۱۹/۰۵	۸۲/۶۵	۲۳/۰۳	۰/۷۲	۱/۱	۰/۱۳
EFAC-6	۱۱/۲۴	۸۶/۲۹	۱۳/۰۲	۰/۵	۰/۸۴	۰/۱۶
EFAC-7	۱۱/۲۴	۸۸/۷۳	۹/۲۹	۰/۴۴	۰/۷۲	۰/۱۷

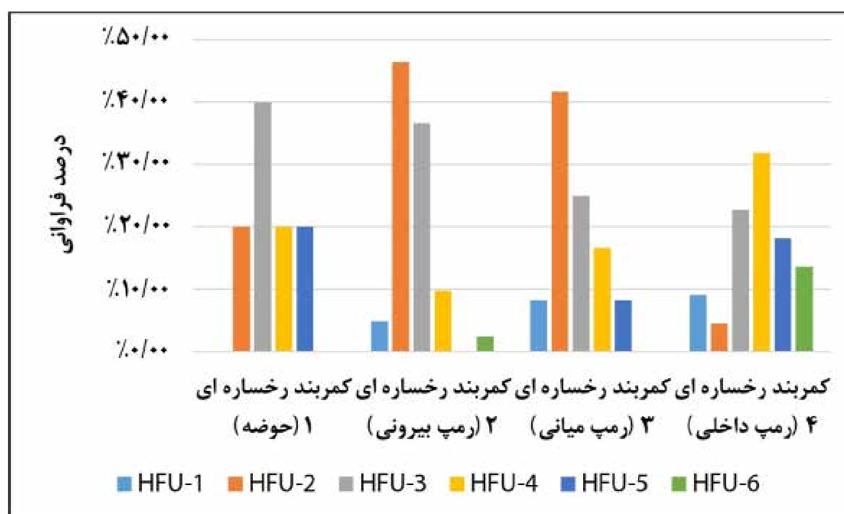
به‌طـور کلـی می‌تـوان ایـن هفـت رخسـاره الکتریکـی را از دیـدگاه کیفیـت مخزنـی در سـه گـروه بـا کیفیـت مخزنـی پاییـن (EFAC-1 تـا EFAC-3)، متوسـط (EFAC-4 و EFAC-5) و بـالا (EFAC-6 و EFAC-7) دسـته‌بندی نمـود. از لحـاظ فراوانـی نیـز رخسـاره الکتریکـی شـماره ۱ فراوانــی بیشــتری نســبت بــه ســایر رخســاره‌های الکتریکـی دارد (شـکل ۱۱). بـرای آزمـون میـزان صحـت و دقـت، نتایـج ایـن بخـش بـا مطالعـات رخسـاره‌های میکروسـکوپی مقایسـه گردیـده اسـت.



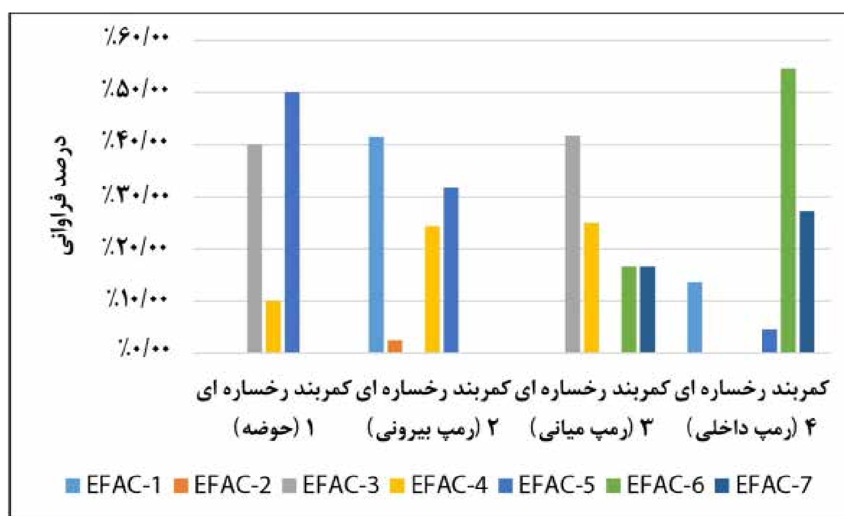
شکل ۱۱ نمودار دایره‌ای فراوانی رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده

بحث

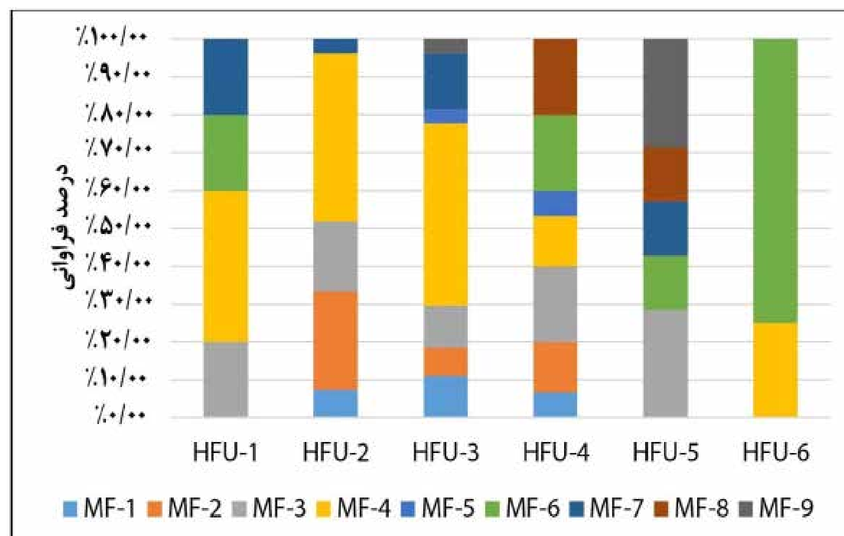
به‌منظور بررسی ارتباط بین رخساره‌های رسوبی با واحدهای جریانی هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی در توالی مطالعه شده از سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه، درصد فراوانی هر یک از واحدهای جریانی هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی در کمربندهای رخساره‌ای مختلف محاسبه شده و نمودار فراوانی میله‌ای آنها رسم گردیده است (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). همان‌طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد، در کمربندهای رخساره‌ای رمپ داخلی، واحدهای جریانی هیدرولیکی با کیفیت متوسط تا بالا از فراوانی بیشتری برخوردار هستند، درحالی‌که در کمربندهای رخساره‌ای حوضه، رمپ خارجی و میانی، واحدهای جریانی هیدرولیکی پایین تا متوسط فراوانی بیشتری دارند. همچنین در شکل ۱۳ نیز ملاحظه می‌گردد، در کمربندهای رخساره‌ای حوضه، رمپ خارجی و میانی، رخساره‌های الکتریکی با کیفیت پایین تا متوسط از فراوانی بیشتری برخوردار هستند، درحالی‌که در کمربند رخساره‌ای رمپ داخلی، رخساره‌های الکتریکی با کیفیت بالا فراوانی بیشتری دارند. همچنین به منظور بررسی توزیع ریزرخساره‌های رسوبی در توالی مطالعه شده از سازند داریان در چاه‌های مورد مطالعه، در هریک از واحدهای جریانی هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی، نمودار فراوانی میله‌ای آنها رسم گردیده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). همان‌طور که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد، در واحدهای جریانی هیدرولیکی با کیفیت بالا نظیر HFU-5 و HFU-6 رخساره‌های رسوبی MF-3, MF-4, MF-6, MF-7, MF-8 و MF-9 قرار دارند که در بین آنها رخساره‌های MF-6 و MF-3 فراوانی بیشتری دارند. در مقابل در واحدهای جریانی هیدرولیکی با کیفیت پایین نظیر HFU-1 و HFU-2 رخساره‌های رسوبی MF-1, MF-2, MF-3, MF-4, MF-6 و MF-7 قرار دارند که در بین آنها رخساره‌های MF-2, MF-3, و MF-4 از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. در شکل ۱۵ نیز ملاحظه می‌گردد، در رخساره‌های الکتریکی با کیفیت بالا نظیر EFAC-6 و EFAC-7 رخساره‌های رسوبی MF-3, MF-5, MF-6 و MF-7 قرار دارند که در بین آنها رخساره‌های MF-6, MF-7 و MF-3 فراوانی بیشتری دارند. در مقابل در رخساره‌های الکتریکی با کیفیت پایین نظیر EFAC-1, EFAC-2 و EFAC-3 رخساره‌های رسوبی MF-3, MF-4, MF-8 و MF-9 قرار دارند که در بین آنها MF-3, MF-4 و MF-9 از فراوانی بیشتری برخوردار هستند. براساس این نمودارها، ارتباطات معناداری بین رخساره‌های رسوبی با واحدهای جریان هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی دیده می‌شود. با ترسیم نمودار SMLP برای سازند داریان، در محدوده مورد مطالعه به‌طور کلی یک زون سرعت، یک زون تله‌ای، یک زون مخزنی و سه زون حدواسط تله‌ای/مخزنی تفکیک شده است. در چاه‌های مورد مطالعه تعداد و نوع واحدهای کلیدی با هم هماهنگی خوبی را نشان می‌دهند. در این مطالعه به جهت اینکه مفهوم زمین‌شناسی به واحدهای جریانی داده شود، ارتباط آنها با رخساره‌های شناسایی شده در سازند داریان در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی مورد بررسی قرار گرفته است.



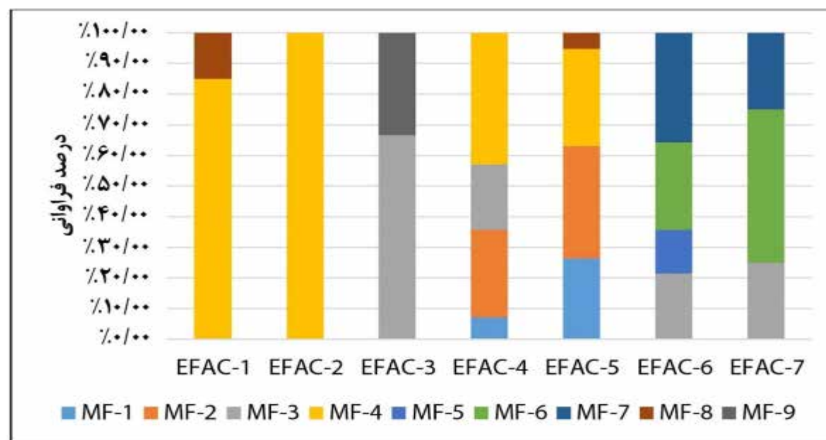
شکل ۱۲ درصد فراوانی انواع واحدهای جریانی هیدرولیکی شناسایی شده در روش نشان‌گر زون جریان در هر یک از کمربندهای رخساره‌ای



شکل ۱۳ درصد فراوانی انواع رخساره‌های الکتریکی تعیین شده در هر یک از کمربندهای رخساره‌ای



شکل ۱۴ توزیع ریزرخساره‌های رسوبی در واحدهای جریانی هیدرولیکی شناسایی شده در روش نشان‌گر زون جریان



شکل ۱۵ توزیع ریزرخساره‌های رسوبی در رخساره‌های الکتریکی تعیین شده

چینه‌نگاری سکانسی در چاه‌های مورد مطالعه از مطالعات پیشین در این چاه‌ها اقتباس گردیده است [۳۸] (شکل ۱۶). در زیر به تشریح واحدهای جریانی شناسایی شده در سازند داریان می‌پردازیم.

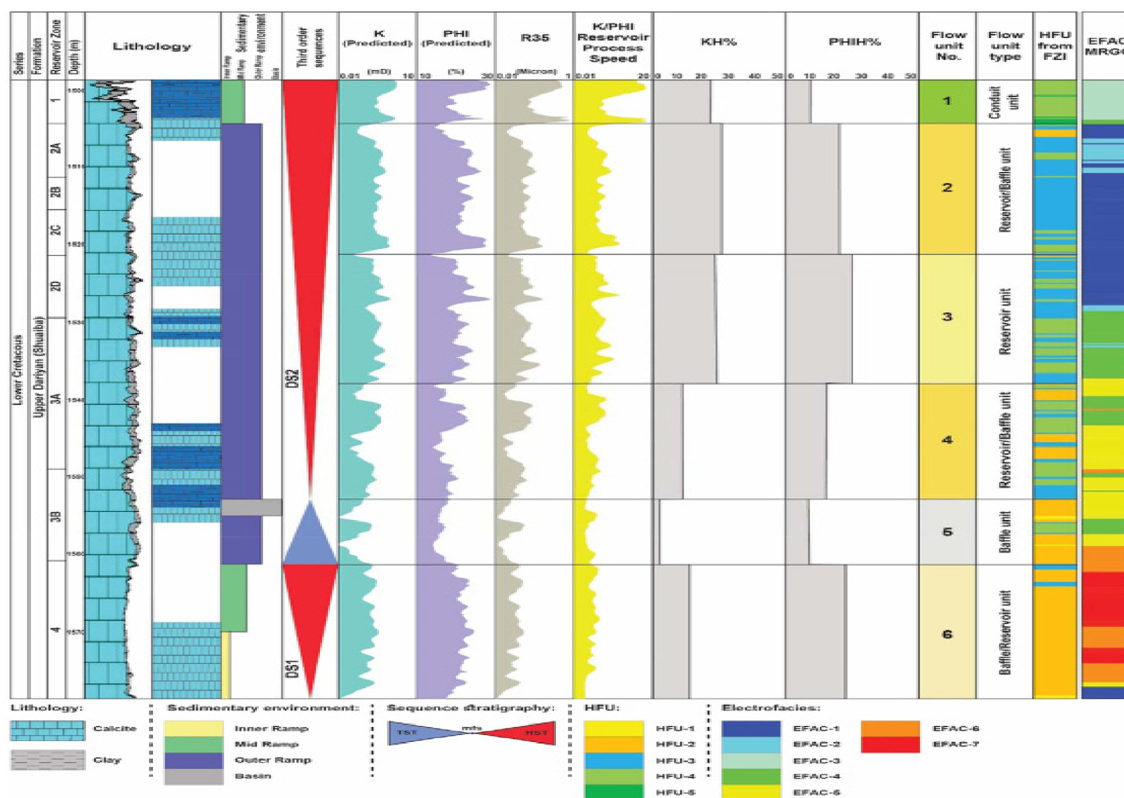
واحد جریانی ۱ (FU-۱): این واحد سرعتی در رأس سازند داریان و در تمامی چاه‌ها مورد مطالعه قابل شناسایی بوده و ضخامت متوسط آن در حدود ۵ m می‌باشد (شکل ۱۶). لیتولوژی غالب این واحد جریانی سنگ آهک آرژلیتی و مارن و اغلب شامل رخساره مادستون/وکستون اوربیتولین‌دار و بایوکلست‌دار است. وجود مارن احتمالاً عامل اصلی در ایجاد زون سرعتی می‌باشد. این واحد جریانی در انتهای HST سکانس دوم و مطابق با زون مخزنی یک در سازند داریان است (شکل ۲). تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۹/۸ تا ۳۰٪ و تراوایی در محدوده ۴ تا ۲۵/۴ mD تغییر می‌کند.

واحد جریانی ۲ (FU-2): این واحد مخزنی/بافلی با ضخامت متوسط ۱۵ m در اکثر چاه‌ها قابل شناسایی است. ضخامت این واحد در چاه F، افزایش یافته و به بیش از ۲۰ m می‌رسد (شکل ۱۷). این واحد از سنگ آهک چاکی اوربیتولین‌دار، بایومیکرایت و بایومیکرورودایت تشکیل شده است و رخساره‌های غالب این واحد جریانی وکستون/مادستون بایوکلست‌دار می‌باشد. این رخساره‌ها عمدتاً دارای فسیل و خرده فسیلی محیط بخش خارجی رمپ[1] هستند. واحد جریانی ۲ در غالب دسته رخساره HST سکانس دوم و مطابق با زون‌های 2A، 2B و 2C در سازند داریان است (شکل ۱۶). تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۱۸ تا ۲۱٪ و تراوایی در محدوده ۰/۷ تا ۳/۶ mD تغییر می‌کند.

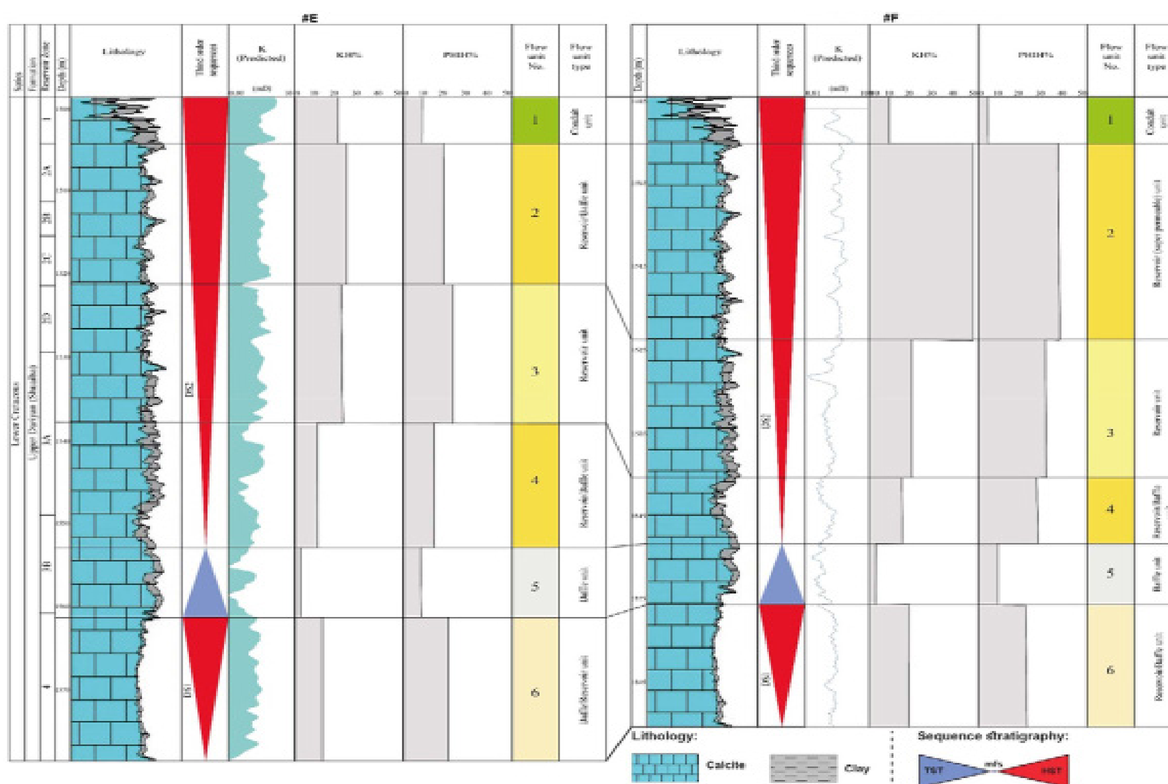
واحد جریانی ۳ (FU-3): این واحد مخزنی با لیتولوژی سنگ آهک آرژیلیتی مشخص می‌شود و عمدتاً از رخساره‌های وکستون/مادستون بایوکلست‌دار، پلاژیک فرامینیفرا وکستون تشکیل شده است که نظیر واحد جریانی قبلی در بخش‌های خارجی رمپ نهشته شده‌اند. ضخامت متوسط این زون جریانی m ۱۵ می‌باشد. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۱۷/۱ تا ۲۹/۷٪ و تراوایی در محدوده ۰/۴ mD تا ۵ تغییر می‌کند. این واحد جریانی نسبت به واحد جریانی ۲ کیفیت مخزنی بهتری دارد که احتمالاً شکستگی‌ها عامل این افزایش کیفیت مخزنی بوده‌اند. واحد جریانی ۳ در غالب دسته رخساره HST سکانس دوم و مطابق با زون 2D و نیمی از زون 3A در سازند داریان است.

واحد جریانی ۴ (FU-4): این واحد مخزنی/بافلی با ضخامت متوسط ۱۵ m از سنگ آهک آرژیلیتی تشکیل شده است و رخساره‌های غالب این واحد جریانی وکستون/مادستون بایوکلست‌دار، پلاژیک فرامینیفرا وکستون می‌باشد.

1. Outer Ramp



شکل ۱۶ ستون جامع کیفیت مخزنی سازند داریان در یکی از چاه‌های مطالعه شده (چاه E) که شامل ستون سنگ‌شناسی، محیط رسوبی، نمودارهای تخلخل، تراوایی، R35، نسبت تخلخل به تراوایی، درصد ظرفیت جریان و ذخیره و واحدهای جریانی براساس FZI و SMLP و رخساره‌های الکتریکی است



شکل ۱۷ تطابق واحدهای جریانی مشخص شده در سازند داریان براساس SMLP در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی، در چاه‌های E و F

ضخامت این زون در چاه F، کاهش یافته و به کمتر از ۱۰ m می‌رسد (شکل ۱۷). این رخساره‌ها عمدتاً دارای فسیل و خرده فسیلی محیط بخش رمپ خارجی هستند. واحد جریانی ۴ در غالب بخش ابتدایی دسته رخساره TST سکانس دوم و مطابق با و بخش‌های پایینی زون 3A و بخش بالایی زون 3B در سازند داریان است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۱۵ تا ۳۳٪ و تراوایی در محدوده ۰/۱ mD تا ۵/۴ تغییر می‌کند. واحد جریانی ۵ (FU-5): این واحد بافلی با ضخامت متوسط ۸ m دارای لیتولوژی غالب سنگ آهک آرژلیتی و شیل با فسیل‌های پلاژیک رادیولاریا و فرامینیفر پلاژیک که شاخص مناطق عمیق حوضه[1] هستند، تشکیل یافته است. رخساره پلاژیک فرامینیفرا وکستون در این واحد بیشترین فراوانی را دارد. این واحد در غالب دسته رخساره TST قرار می‌گیرد و در سایر چاه‌ها قابل تطابق است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۱۲ تا ۲۴٪ و تراوایی در محدوده ۰/۰۷ mD تا ۰/۹ تغییر می‌کند. این واحد جریانی ضعیف‌ترین واحد جریانی در سازند داریان از لحاظ کیفیت مخزنی می‌باشد. واحد جریانی ۴ مطابق با زون 3B در سازند داریان است.

واحد جریانی ۶ (FU-6): این واحد یک واحد بافلی تا مخزنی و دارای لیتولوژی سنگ آهک به ضخامت متوسط ۲۰ m است. ضخامت این واحد در چاه F، به کمتر از ۲۰ m می‌رسد (شکل ۱۷). رخساره‌های این واحد جریانی بسیار متنوع هستند که فراوان‌ترین آنها شامل وکستون/مادستون اوربیتولین‌دار و بایوکلست‌دار، باندستون، فلوتستون لیتوکدیوم و فرامینیفردار و وکستون/پکستون فرامینیفر و اینتراکلست‌دار است. از دلایل بهبود کیفیت مخزنی در این واحد جریانی وجود رخساره‌های باندستونی و فلوتستونی است. این واحد در غالب دسته رخساره HST سکانس اول قرار می‌گیرد و در سایر چاه‌ها قابل تطابق است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۹/۵۱ تا ۳۶/۴۴٪ و تراوایی در محدوده mD ۰/۶ تا ۹ تغییر می‌کند. واحد جریانی ۵ مطابق با زون ۴ در سازند داریان است. در این مطالعه که از روش‌های مختلف تعیین گونه‌های سنگی نظیر روش نشانگر زون جریان، نمودار چینه‌ای اصلاح شدهٔ لورنز، وینلند، لوسیا و همچنین مفهوم رخساره‌های الکتریکی برای سازند داریان استفاده گردیده، مقایسه نتایج روش‌های مذکور و کالیبراسیون نتایج آنها با آنچه که از مطالعات پتروگرافی به‌دست آمده، حاکی از همخوانی نتایج با یکدیگر دارد. به‌طوری‌که رخساره‌های میکروسکوپی با پتانسیل کیفیت مخزنی بالا در گونه‌های سنگی (واحدهای جریانی و رخساره‌های الکتریکی) با کیفیت مخزنی بالا قرار می‌گیرند. همچنین با بررسی پراکندگی گونه‌های سنگی در چارچوب سکانس‌ها و دسته‌های رخساره‌ای نشان می‌دهد رخساره‌های دانه غالب فسیل‌دار و رخساره‌های باندستونی متعلق به کمربند رخساره‌ای رمپ داخلی بهترین افق‌های مخزنی را در دسته رخساره‌ای HST از سکانس اول و دوم به وجود آورده‌اند که می‌توانند منطقه هدف در راستای افزایش تولید و توسعه میادین در نظر گرفته شود. بر خلاف آن، رخساره‌های گل غالب متعلق به کمربندهای رخساره‌ای حوضه و رمپ خارجی سبب تشکیل افق‌های با کیفیت مخزنی پایین در دسته رخساره TST، گردیده‌اند. پیش از این مطالعه، سازند داریان از دیدگاه کیفیت مخزنی مورد بررسی قرار گرفته است به‌طوری که مهرابی و همکاران [۷] با مطالعه سازند داریان در چندین میدان نفتی در خلیج فارس، بهترین واحدهای مخزنی با کیفیت بالای این سازند را معرفی نموده‌اند که عبارت است از: اولین واحدهای مخزنی با کیفیت بالای سازند داریان، واحدهایی هستند که در زیر سطوح ناپیوسته قرار دارند، جایی‌که رخساره‌ها تحت تأثیر انحلال جوی قرار گرفته‌اند و همین امر منجر به ایجاد منافذ مرتبط و غیرمرتبط در رخساره‌های متعلق به دسته رخساره‌ای تراز بالا

1. Basin

(HST) در واحدهای کربنات پایینی و بالایی سازند داریان شده است. دومین واحدهای مخزنی سازند داریان در رخساره‌های لیتوکودیومی-جلبکی مربوط به زیرمحیط رمپ داخلی تشکیل شده است. پتانسیل مخزنی اولیه بالای این رخساره‌ها بر اثر عملکرد فرآیندهای دیاژنتیکی جوی (عمدتاً انحلال جوی) حفظ شده و حتی افزایش نیز پیدا کرده است. واحدهای جریانی تفکیک شده با استفاده از روش نشانگر زون جریان برای مقایسه با واحدهای جریانی به‌دست آمده از نمودار چینه‌ای اصلاح شدهٔ لورنز در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی رسم شده‌اند (شکل ۱۶). اصلی‌ترین تفاوت این دو دسته جریانی در مقیاس این دو است. اما در صورتی که واحدهای جریانی تفکیک شده با استفاده از FZI به شکل گروهی بررسی گردند اختلاف چندانی بین آنها وجود ندارد. به‌طوری‌که واحدهای جریانی HFU-1 و HFU-2 (رنگ‌های زرد و نارنجی) در واحدهای جریانی FU-4 و FU-5 تفکیک شده از روش لورنز که ویژگی بافلی دارد، فراوان‌تر هستند. برخلاف آن واحدهای جریانی HFU-3 و HFU-4 (رنگ‌های آبی و سبز) در واحد جریانی FU-3 که ویژگی مخزن دارد، غالب هستند. اگرچه واحد جریانی HFU-5 دارای بالاترین کیفیت مخزنی در بین واحدهای جریانی به‌دست آمده از FZI است اما فراوانی آن کم و تنها در واحد جریانی FU-1 (زون سرعت)، حضور دارد. به‌طور کلی واحدهای جریانی حاصل از SMLP به واسطه قدرت تفکیک پایین‌تر خود در مقیاس میدانی قابل تطابق هستند. این در حالی است که تطابق و ردیابی یک واحد جریانی منفرد براساس FZI در مقیاس میدانی بسیار مشکل و حتی غیر ممکن است. زیرا این واحدها با تغییرات رخساره‌ای و یا دیاژنزی در جوانب به یکدیگر تبدیل می‌شوند. بنابراین برای تعیین وضعیت کلی و چارچوب جریانی یک مخزن در مقیاس میدانی به‌کارگیری واحدهای جریانی به‌دست آمده از روش SMLP مناسب‌تر می‌باشد [۵]. بررسی نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد بهترین روش‌ها برای تعیین گونه‌های سنگی از جنبه کیفیت مخزنی در این مخزن (سازند داریان) تفکیک واحدهای جریانی برمبنای داده‌های پیوسته نمودارهای پتروفیزیکی (چاه‌پیمایی) با استفاده از دو روش FZI و SMLP می‌باشد. از آنجایی که داده‌های نمودارهای پتروفیزیکی به‌طور پیوسته از تمامی محدوده مخزن برداشت می‌گردند، لذا این دو روش بهترین و کامل‌ترین روش‌ها در تفکیک گونه‌های سنگی در مخازن کربناته می‌باشند که می‌توان از این دو روش در چاه‌هایی که فاقد مغزه هستند جهت شناخت بهتر مخزن و برای تعیین گونه‌های سنگی و واحدهای جریانی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، گونه‌های سنگی مخزنی سازند داریان در شش چاه از یک میدان نفتی واقع در شرق خلیج فارس توسط روش‌های مختلف تعیین گردید که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

* مطالعات پتروگرافی منجر به شناسایی نه رخسارهٔ رسوبی در پنج زیرمحیط رخساره‌ای شامل حوضه، رمپ بیرونی، رمپ میانی، و رمپ درونی گردید. همچنین عوارضی از قبیل انحلال، دولومیتی شدن، شکستگی، میکرایتی شدن، تراکم (مکانیکی و شیمیایی) و زیست آشفتگی به‌عنوان مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شد.

* با استفاده از داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، براساس روش نشانگر زون جریان تعداد شش واحد جریان هیدرولیکی، براساس رابطه وینلند تعداد چهار گونه سنگی و براساس نمودار لوسیا تعداد سه کلاس پتروفیزیکی شناسایی گردید. همچنین برمبنای داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی براساس نشانگر زون جریان تعداد پنج واحد جریان هیدرولیکی و براساس نمودار چینه‌ای اصلاح شدهٔ لورنز تعداد شش واحد مخزنی و غیرمخزنی تعیین گردید.

* با استفاده از داده‌های نمودارهای پتروفیزیکی قبیل گاما (GR)، صوت (DT)، نوترون (NPHI) و مقاومت (نظیر ILD, MLL) و به‌کارگیری روش MRGC هفت رخساره الکتریکی شناسایی گردید.
* در نهایت با تلفیق نتایج حاصل از روش‌های مختلف مطالعه شده در تعیین گونه سنگی در چارچوب سکانس‌ها و دسته‌های رخساره‌ای به بررسی ارتباطات موجود بین آنها و جایگاه‌های سکانسی پرداخته شد. در نتیجه رخساره‌های دانه غالب فسیل‌دار و رخساره‌های باندستونی متعلق به کمربند رخساره‌ای رمپ داخلی بهترین افق‌های مخزنی را در دسته رخساره‌ای HST از سکانس اول و دوم به وجود آورده‌اند که می‌تواند منطقه هدف در راستای افزایش تولید و توسعه میادین در نظر گرفته شود. بر خلاف آن، رخساره‌های گل غالب متعلق به کمربندهای رخساره‌ای حوضه و رمپ خارجی سبب تشکیل افق‌های با کیفیت مخزنی پایین در دسته رخساره TST، گردیده‌اند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اداره پژوهش و فناوری شرکت نفت فلات قاره به‌سبب حمایت از این تحقیق و از اداره زمین‌شناسی به‌دلیل در اختیار قرار دادن داده‌ها سپاس‌گزاری می‌نمایند. همچنین از واحد پتروفیزیک پژوهشگاه صنعت نفت به‌سبب در اختیار قرار دادن اطلاعات داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی تشکر می‌گردد.

مراجع

[1]. Gomes J S, Ribeiro M T, Strohmenger C J, Negahban S, Kalam M Z (2008) Carbonate reservoir rock typing – the link between geology and SCAL, One Petro, SPE, 118284, 1-14, doi.org/10.2118/118284-MS.
[2]. Soto R, Garcia J C (2001) Permeability prediction using hydraulic flow units and hybrid soft computing systems, one Petro SPE, 71455, doi.org/10.2118/71455-MS.
[3]. Skalinski M, Kenter J A M (2014) Carbonate petrophysical rock typing: integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behaviour, Geological Society, London, Special Publications, 406: 229–259, doi.org/10.1144/SP406.6.
[4]. Kadkhodaie-Ilkhchi A, Kadkhodaie-Ilkhchi R (2018) A review of reservoir rock typing methods in carbonate reservoirs: relation between geological, seismic, and reservoir rock types, Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology, 7, 4: 13-35, doi.org/10.22050/ijogst.2019.136243.1461.
[۵]. صالحی، م ع، کاظم شیرودی، س، موسوی حرمی س ر، غفوری م، لشکری‌پور غ ر (۱۳۹۴) تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی برای بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میادین نفتی بخش مرکزی خلیج فارس، مجله پژوهش نفت، ۸۴، ۷۲-۸۷، doi: pr.2015.550/10.22078.
[6]. Malekzadeh H, Daraei M, Bayet-Goll A (2020) Field-scale reservoir zonation of the Albian–Turonian Sarvak Formation within the regional-scale geologic framework: A case from the Dezful Embayment, SW Iran, Marine and Petroleum Geology, 121: 104586, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104586.
[7]. Mehrabi H, Rhimpour-Bonab H, Hajikazemi E, Esrafili-Dizaji B (2015) Geological reservoir characterization of the Lower Cretaceous Dariyan Formation (Shu›aiba equivalent) in the Persian Gulf, southern Iran, Marine and Petroleum Geology, 68: 132-157, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.08.014.
[8]. Naderi-Khujin M, Seyrafian A, Vaziri-Moghaddam H, Tavakoli V (2016) Characterization of the late aptian top-dariyan disconformity surface offshore Sw Iran: A multi-Proxy approach, Journal of Petroleum Geology, 39: 269-286, doi.org/10.1111/jpg.12646.
[9]. Naderi-Khujin M, Seyrafian A, Vaziri-Moghaddam H, Tavakoli V (2016) A record of global change: OAE 1a in Dariyan shallow-water platform carbonates, southern Tethys, Persian Gulf, Iran. Facies, 62: 25.
[10]. James G A, Wynd G (1965) Stratigraphical nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area, AAPG Bulletin, 49: 2182–2245 doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D, .
[11]. Sharland P R, Archer R, Casey D M, Davies R B, Hall S H, Heyward A P, Horbury A D, Simmons M D (2001) Arabian plate sequence stratigraphy. GeoArabia 371, Special Publication 2, 27 105: 117-130 doi.org/10.22071/gsj.2017.53934.
[12]. Tavakoli V (2021) The Effects of petrophysical heterogeneities on calculations of water saturation, Dariyan

Formation in the central part of Persian Gulf, The 13th, National Geological Conference of Payame Noor University, 6-12.
[13]. Alsharhan A S, Nairn A E M (1997) Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East. Elsevier Science.
[14]. Sepehr M, Cosgrove J W (2005) Role of the Kazerun fault zone in the formation and deformation of the Zagros fold thrust belt, Iran, Tectonics, 24, TC5005, doi.org/10.1029/2004TC001725.
[15]. van Buchem F S P, Al-Husseini M I, Maurer F, Droste H J, Yose L A (2010) Sequence-stratigraphic synthesis of the Barremian- Aptian of the eastern Arabian Plate and implications for the petroleum habitat, In: van Buchem, F. S. P., Al-Husseini, M. I., Maurer, F., Droste, H. J. (Eds.), Barremian - Aptian Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Eastern Arabian Plate, GeoArabia 1, 9e48. Special Publication 4, Gulf PetroLink, Bahrain, 4: 1.
[16]. Droste H J (2010) Sequence-stratigraphic framework of the Aptian Shu'aiba Formation in the Sultanate of Oman, GeoArabia, 229-283, 4: 1.
[17]. Maurer F, van Buchem F S P, Eberli G P, Pierson B J, Raven M J, Larsen P H, Al-Husseini M I, Vincent B (2013) Late Aptian long-lived glacio-eustatic lowstand recorded on the Arabian Plate, Terra Nova, 25, 2: 87-94, doi.org/10.1111/ter.12009.
[18]. Moosavizadeh M A, Mahboubi A, Moussavi-Harami R, Kavoosi M A (2013) Early Aptian oceanic anoxic event (OAE 1a) in Northeastern Arabian Plate setting: an example from Dariyan Formation in Zagros fold–trust belt, SE Iran. Arabian Journal of Geosciences, 7: 4745–4756.
[19]. Mehrabi H, Ranjbar-Karami R, Roshani-Nejad M (2019) Reservoir rock typing and zonation in sequence stratigraphic framework of the Cretaceous Dariyan Formation, Persian Gulf, Carbonates and Evaporites, 34: 1833–1853.
[20]. Granier B, Busnardo R (2013) New stratigraphic data on the Aptian of the Persian Gulf, Cretaceous Research 39: 170-182, doi.org/10.1016/j.cretres.2012.02.011.
[21]. Ghazban F (2007) Petroleum Geology of the Persian Gulf. Tehran University Press, 707.
[22]. Dunham R J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture, AAPG Memoir, 1: 108–121.
[23]. Embry A F, Klovan J E (1971) A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island Nordwest Territories, Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 19: 730–781, doi.org/10.35767/gscpgbull.19.4.730.
[24]. Flügel E (2010) Microfacies of Carbonate Rocks: analysis, interpretation andapplication (second edition), Springer-Verlag, Berlin, 976.
[25]. Embry A F, Johannessen E P (1992) T–R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic–Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada, Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2: 121-146, doi.org/10.1016/B978-0-444-88943-0.50013-7.
[26]. Embry A F (2002) Transgressive-regressive (T–R) sequence stratigraphy. Program and abstracts—society of economic paleontologists, Gulf Coast Sect Res Conf, 22: 151–172.
[27]. Catuneanu O (2002) Sequence stratigraphy of clastic systems: Concepts, merits, and pitfalls, Journal of African Earth Sciences. 35: 1-43, doi.org/10.1016/S0899-5362(02)00004-0.
[28]. Gunter G W, Finneran J M, Hartmann D J, Miller J D (1997) Early Determination of Reservoir Flow Units Using an Integrated Petrophysical Method, SPE 38679, 1–8, doi.org/10.2118/38679-MS.
[29]. Winland H D (1972) Oil Accumulation in Response to Pore Size Changes, Weyburn Field, Saskatchewan, Amoco Production Research Report, F72-G-25.
[30]. Lucia F J (1995) Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization, AAPG Bulletin, 79: 1275–1300, doi.org/10.1306/7834D4A4-1721-11D7-8645000102C1865D.
[31]. Amaefule J O, Altunbay M, Tiab D, Kersey D G, Keelan D K (1993) Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells, SPE, 26436: 1–16, doi.org/10.2118/26436-MS.
[32]. Kolodzie, S. Jr. (1980). Analysis of pore throat size and use of the Waxmann–Smits equation to determine OOIP in Spindle Field, Colorado, 55th Annual Technology Fall Conference, Society of Petroleum Engineers, SPE, 9382, doi.org/10.2118/9382-MS.
[33]. Rahimpour-Bonab H, Mehrabi H, Navidtalab A, Izadi-Mazidi E (2012) Flow unit distribution and reservoir modelling in cretaceous carbonates of the Sarvak Formation, Abteymour Oilfield, Dezful Embayment, SW Iran, Journal of Petroleum Geology, 35, 3: 213–236, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2012.00527.x.
[34]. Jennings J, Lucia F (2001) Predicting permeability from well logs in carbonates with a link to geology for interwell permeability mapping, Society of Petroleum Engineers, 71336, doi.org/10.2118/84942-PA.
[35]. Serra O (1986) Fundamentals of Well Log Interpretation. v. 2: The Interpretation of Logging Data, Developments in Petroleum Science, Elsevier, Amesterdam, 648, doi:10.4236/ns.2011.36062.

[36]. Rabiller P (2005) Acies prediction and data modeling for reservoir characteriation, 1st ed. Rabiller Geo-consulting,doi.org/10.1190/urtec2013-225.
[37]. IOOC/TEC (2006) Geo-Science Studies of Reshadat Field (Renovation and Development Project), Interim Report, 4.1, 155.
[38]. Mapsa (2013) Rock typing of the dariyan (shuaiba) formation in the reshadat field (CR#10), 33.
[39]. Lucia F J (1999) Carbonate Reservoir Characterization, Springer-Verlag.
[40]. Svirsky D, Ryazanov A, Pankov M, Corbett P, Posysoev A (2004) Hydrolic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oil field, SPE 87056, doi.org/10.2118/87056-MS.

کیفیت متفاوت بندش سیمان چاه در سازندهای زمین‌شناسی میدان-گازی خانگیران، شمال شرق ایران

حامدقربانپور[۱*]، امیر نقیبی[۲]، مهدی علویان[۳] و ابوذر بهاری[۴]

۱- گروه زمین‌شناسی نفت، اداره عملیات مهندسی مخازن، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز شرق، مشهد، ایران

۲- اداره مهندسی پتروفیزیک، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران، تهران، ایران

۳- اداره تعمیر و تکمیل، چاه‌ها، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز شرق، مشهد، ایران

۴- اداره مهندسی بهره‌برداری، شرکت بهره برداری نفت و گاز شرق، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

چکیده

در چاه‌های نفت و گاز، کیفیت سیمان‌بندی پشت لوله‌های جداری و آستری، نقش بسزایی در استمرار تولید ایمن و کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیرهای احتمالی آتی چاه‌ها دارد. سیمان‌بندی مناسب، سبب جلوگیری از جریان‌های بین لایه‌ای در پشت لوله‌ها، کاهش شدت خوردگی دیواره خارجی لوله‌ها، جلوگیری از نشتی دالیزها و لبه لوله آستری، جلوگیری از حرکت آب از اعماق به سمت زون‌های مخزنی فوقانی از فضای پشت لوله‌ها و سبب جلوگیری از نشست زمین در اثر نفوذ آب از اعماق به لایه‌های سطحی زمین می‌گردد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که جدا از نحوه عملیات سیمان‌کاری و ترکیبات سیمان، خواص سنگ و سیال سازندی نیز بر کیفیت بندش سیمان تاثیرگذار است. در چاه‌های حفاری شده میدان گازی خانگیران، عمدتاً کیفیت سیمان‌بندی در زونهای خاصی از سازندهای رسوبی نامناسب است. در این تحقیق پس از اعمال زون‌بندی پتروفیزیکی بر روی سازندهای میدان خانگیران، ابتدا زون‌هایی که معمولاً کیفیت سیمان‌بندی در آنها پایین است شناسایی شدند (مانند زون ۳ سازند آبدراز)؛ سپس دلایل این رویداد بررسی شد. مانند وجود تراوایی زیاد در زون ۱ سازند کلات و در نهایت برخی راهکارهای پیشنهادی جهت جلوگیری از تکرار این پدیده در حفاری چاه‌های آتی ارائه گردید. مانند تغییر عمق قرارگیری پاشنه لوله‌های جداری. مهمترین زون‌های که سیمان‌بندی در آنها ضعیف است، شامل زون‌های متخلخل و تراوا و زون‌های گاز دار می‌باشند.

کلمات کلیدی: میدان خانگیران-سیمان‌بندی- لوله‌های‌جداری-زون‌بندی-سازند.

---

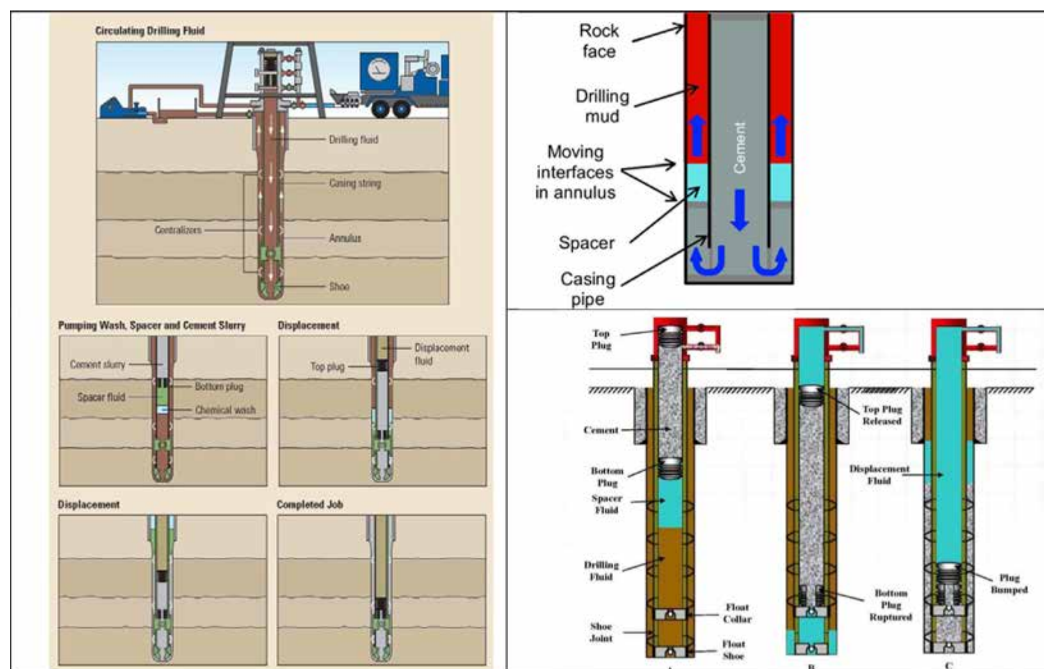
*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی ghorbanpour_geo@yahoo.com

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4901.3191)

مقدمه

یکی از فرآیندهای مهم در حفاری چاه‌های نفت و گاز، سیمان‌کاری پشت لوله‌های جداری و آستری[1]، می‌باشد. در صنعت نفت چاه‌ها به‌صورت تلسکوپی حفاری می‌شوند به‌گونه‌ای که هرچه به سمت عمق پیش می‌رویم قطر چاه کاهش می‌یابد. در عملیات سیمان‌کاری، پس از محاسبه حجم فضای خالی[2] پشت لوله‌های جداری یا آستری، سیمان به درون چاه پمپ و بر روی آن سیال قرار می‌گیرد. سپس با اعمال فشار بر روی سیال، سیمان از انتهای چاه به پشت لوله‌ها تزریق و فشار ترخیص می‌گردد (شکل ۱). با توجه به حدفاصل سیمان‌کاری، فشار و دمای سازند و اهداف مدنظر، سیمان‌های متفاوتی با زمان‌های بندش متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیمان‌های استفاده شده در صنعت نفت به طور عمده مطابق طبقه‌بندی انستیتوی نفت آمریکا (API[3]) چاپ شده در استاندارد شماره ۱۰ طبقه‌بندی شده‌اند. این سیمان‌ها را به ترتیب با حروف A، B، C، D، E، F، G، H و J نام‌گذاری کرده‌اند و علاوه بر اینها، سیمان‌های ویژه‌ای نیز ممکن است در صنعت نفت مورد استفاده قرار گیرند که از جمله می‌توان به سیمان پازلانی، پازلانی-آهکی، پلاستیکی یا رزین، گچی، گازوییلی، انبساطی، نسوز، لاتکسی و سیمان‌های ضدیخ اشاره نمود [۱]. همچنین ممکن است سیمان ویژه‌ای برای سازند خاصی در یک میدان گازی یا نفتی طراحی یا توصیه گردد که از جمله می‌توان به مطالعات پژوهشگاه صنعت نفت بر روی سیمان بهینه میدان گازی خانگیران اشاره نمود [۲]. به‌عنوان مثال در این طرح پیشنهاد شده است جهت جلوگیری از نفوذ گاز به سیمان، مدت زمان ژلگی دوغاب سیمان از روش سنتی ۸۰ min به مدت ۱۷ min کاهش یابد. در طرح دیگری پیشنهاد شده است به‌منظور جلوگیری از ورود گاز به دوغاب سیمان می‌توان از سه ماده مگنتیت، Anchorage Clay و مقادیر خاصی از نسبت آب و الاستومر استفاده نمود [۳].



شکل ۱ نحوه سیمان کاری چاه‌ها [۴].

1. Casing and Liner
2. Annulus
3. American Petrolume Institute

به‌منظور سیمان‌کاری یک لوله جداری خاص، ممکن است فقط از یک کلاس سیمان استفاده شود و یا چند کلاس مختلف سیمان به‌صورت طبقه طبقه به درون چاه تزریق شود تا هر کلاس سیمان در مقابل یک عمق خاص قرار گیرد. به‌طور مثال، از بهترین و مقاوم‌ترین نوع سیمان جهت پوشاندن حد فاصل پاشنه جداری‌ها استفاده می‌شود و بر روی آن می‌تواند سیمان‌های دیگری قرار گیرد. پس از تزریق سیمان به پشت لوله‌ها، مشاهده برگشت سیمان در سطح زمین یکی از نشانه‌های سیمان‌بندی خوب می‌باشد. چنانچه برگشت سیمان در سطح مشاهده نگردد قاعدتاً بخشی از فواصل فوقانی پشت لوله‌ها از سیمان خالی مانده است که دلیل آن هرزروی بخشی از سیمان به درون سازندهای زمین‌شناسی و یا تخمین کم حجم فضای خالی پشت لوله‌ها به‌دلیل ریزش شدید دیواره چاه می‌باشد. اما گاهی با وجود برگشت سیمان به سطح و مشاهده بندش خوب نمونه سیمان نگهداری شده در سطح زمین، نتایج نمودارهای بندش سیمان (مانند نمودار CBL-VDL [1]) نشان می‌دهد که در برخی از فواصل خاص، بندش سیمان ضعیف است. در موارد نادری نیز مشاهده شده است که سیمان به لوله جداری خوب چسبیده ولی بندش خوبی به سازند ندارد. همچنین، نتایج نمودارهای بندش سیمان آزیموتال (مانند نمودارهای CAST[2]، RBT[3]، SBT[4] و USIT[5])، نشان می‌دهد که گاهاً کیفیت سیمان‌بندی فواصل شعاعی اطراف لوله‌ها یکسان نمی‌باشد. به‌عنوان مثال، در چاه‌های زاویه‌دار، در قسمت خواب لوله‌های جداری[6] و در چاه‌های عمودی در مکان‌های که لوله‌های جداری از حالت هم‌مرکز خارج شده و به یک طرف دیواره چاه تکیه کرده است، به‌دلیل نفوذ کم سیمان به پشت لوله‌ها، پدیده کانالی شدن سیمان[7] مشاهده می‌گردد. به‌طور کلی، می‌توان گفت معمولاً سیمان‌بندی قسمت انتهایی چاه و فواصل نزدیک به پاشنه لوله جداری به‌دلیل کیفیت بهتر سیمان مورد استفاده و پابرجا ماندن خصوصیات فیزیکی و شیمیای سیمان، بهتر است. ولی هرچه به سمت سطح حرکت می‌کنیم، به دلیل ترکیب احتمالی سیمان با خرده سنگ‌ها و سیال سازندی مسیر حرکت خود، ممکن است خواص آن تغییر یافته و کیفیت سیمان‌بندی کاهش یابد. همچنین در برخی از چاه‌های زاویه دار مشاهده شده است که کیفیت سیمان‌بندی از چندین متر پایین‌تر از عمقی که چاه شروع به کج شدن می‌نماید (KOP [8]) به سمت پایین خوب است ولی به سمت بالا و قسمت‌های عمودی فوقانی چاه، سیمان‌بندی ضعیف می‌شود. به‌نظر می‌رسد در این دسته از چاه‌ها، ابزار تمرکز دهنده اطراف لوله‌های جداری تحمل وزن لوله‌ها را نداشته و لوله‌ها بر روی سازند می‌نشینند. از طرفی، ابزار نمودارگیری نیز می‌تواند در قسمت زاوایه دار چاه از حالت هم‌مرکز خارج شده و به سمت خواب لوله‌ها نزدیک گردد. در نتیجه، سازند چسبیده به لوله‌ها می‌تواند به اشتباه به‌صورت سیمان‌بندی خوب تفسیر شود.

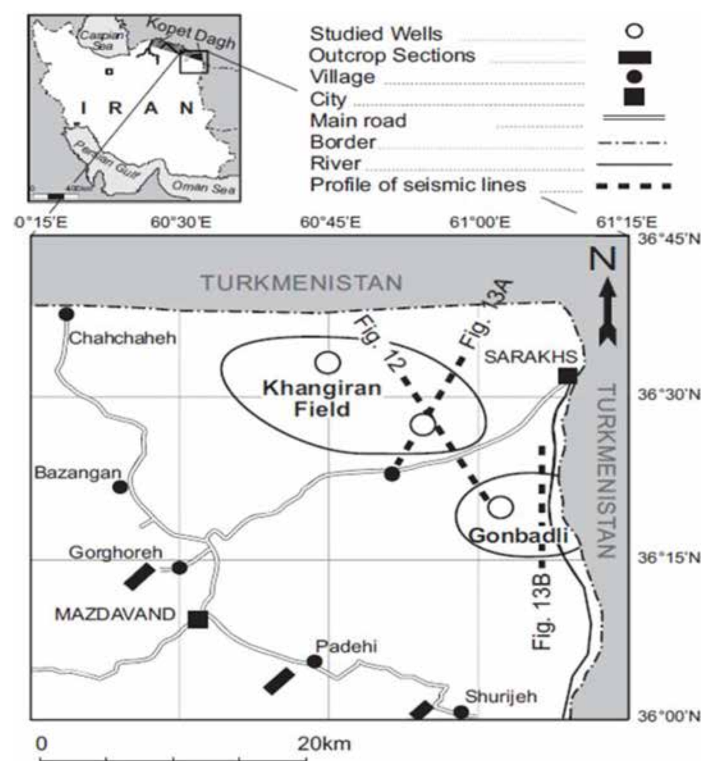
سیمان کاری چاه‌های نفت و گاز یک کار کاملاً تخصصی بوده و موفقیت آن تابع تخصص، همکاری مناسب و مشورت چندین گروه کاری از جمله نماینده کارفرما[9]، نماینده پیمانکار دکل حفاری[10]، واحد شیمی حفاری و گِل، گروه پمپ تراک و لوله مغزی سیار، واحد مهندسی پتروفیزیک و واحد زمین‌شناسی می باشد. به عنوان مثال، تخمین صحیح حجم فضای ریزشی چاه به کمک نمودارهای قطرسنج و تخمین صحیح دمای انتها و ستون چاه به کمک ابزارهایی با حساسیت دمایی بالا، از جمله کمک‌های مهم ناظر عملیات نمودارگیری به انجام صحیح عملیات سیمان‌کاری چاه می‌باشد.

1. Cement Band Log-Variable Density Log
2. Circumferential Acoustic Scanning Tool
3. Radial Bond Tool
4. Segmented Bond Tool
5. Ultra Sonic Imager Tool
6. Low side
7. Cement Channeling
8. Kickoff Point
9. Company Man
10. Tool Pusher

تاکنون مطالعات زیادی بر روی چگونگی انجام عملیات سیمان‌کاری و یا دلایل نامناسب بودن کیفیت سیمان [۱-۳، ۵-۶] انجام شده است. همچنین مطالعاتی در خصوص دلایل کاهش کیفیت سیمان در مقابل سازندهای زمین‌شناسی انجام گردیده که از جمله می‌توان به بررسی دلایل کاهش کیفیت سیمان در مقابل سازند گچساران اشاره نمود [۷]. ولی تا کنون در خصوص بررسی کیفیت سیمان در مقابل سازندهای زمین‌شناسی حوضه رسوبی کپه‌داغ که در چاه‌های میدان گازی خانگیران حفاری شده است، بررسی جامع ای انجام نشده است. در این مطالعه بیشتر بر این موضوع متمرکز شده‌ایم که چرا در برخی چاه‌های خانگیران با وجود رعایت تمامی اصول سیمان‌کاری، در برخی از فواصل خاص سازندها، کیفیت سیمان‌بندی معمولاً ضعیف است. برای این منظور ابتدا سازندها به زون‌های پتروفیزیکی تقسیم‌بندی و در یک کار آماری زون‌هایی که عمدتاً سیمان‌بندی در آن ضعیف است شناسایی شدند. سپس در مورد دلایل وقوع این رویداد مطالعه و در نهایت برخی راهکارهای برطرف نمودن مشکل در حفاری چاه‌های آتی معرفی گردید.

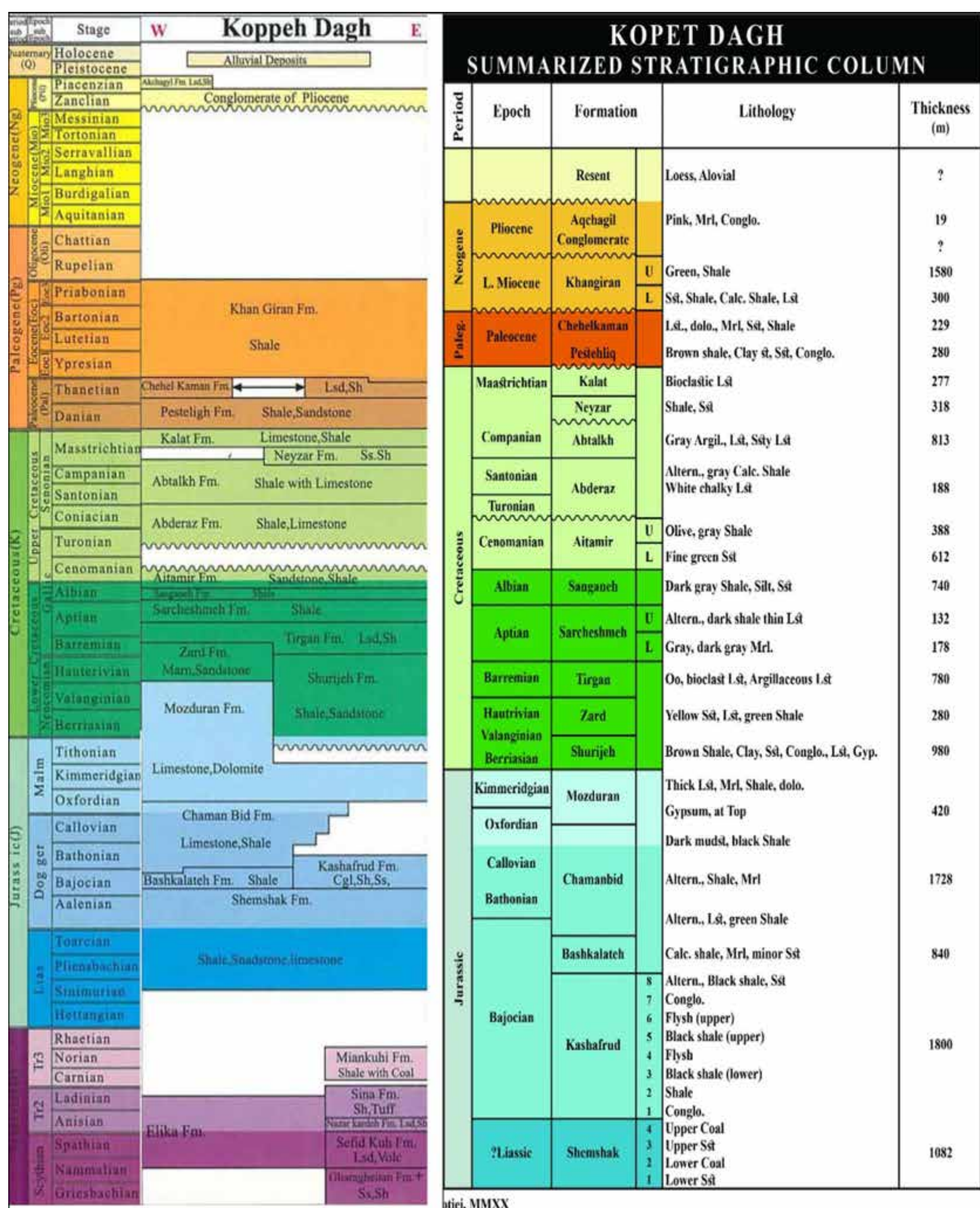
موقعیت جغرافیایی و سازندهای زمین شناسی مورد مطالعه

این تحقیق بر روی سازندهای زمین‌شناسی حوضه رسوبی کپه داغ [۸] که در چاه‌های میدان گازی خانگیران حفاری شده اند انجام شده است. میدان خانگیران (شکل ۲) یک میدان گازی در شمال شرق ایران است که در حوضه رسوبی کپه داغ واقع است. در حال حاضر از دو سازند مخزنی شوریجه (گاز شیرین) و مزدوران (گاز ترش) این میدان بهره‌برداری می‌شود.



شکل ۲ موقعیت میدان گازی خانگیران در شمال شرق ایران [۹].

در شکل ۳ ستون چینه زمین‌شناسی و سازندهای حوضه رسوبی کپه داغ ارائه در حدفاصل سنی دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک ارائه شده است. سازندهای مورد بررسی در میدان گازی خانگیران از سطح به عمق شامل سازند خانگیران، چهل کمان، پسته لیق، نفته، کلات، نیزار، آب تلخ، آب دراز، آیتامیر، سنگانه، سرچشمه، تیرگان، شوریجه و مزدوران می‌باشد که محدوده سنی دوران پالئوژن (از انتهای ائوسن، حدود ۳۵ میلیون سال پیش) تا قسمت فوقانی دوران ژوراسیک میانی (حدود ۱۶۵ میلیون سال پیش) را در بر می‌گیرد. شایان ذکر است بر اساس برخی از آخرین مطالعات صورت گرفته [۱۰] در زمان مرز سنی برخی از سازندها مانند خانگیران تغییراتی پیشنهاد شده است که البته هنوز نهایی نشده است (شکل ۳).



شکل ۳ ستون چینه سازندهای حوضه رسوبی کپه داغ مربوط به دوران مزوزوئیک و سنوزوئیک تصویر سمت راست [۱۱] و تصویر سمت چپ [۱۲].

روش کار

در این مطالعه، ابتدا بر اساس خصوصیات زمین‌شناسی، پتروفیزیکی، حفاری و مخزنی سازندهای خانگیران تا مزدوران، این سازندها در ۷۷ چاه میدان خانگیران به زون‌های مختلف تقسیم‌بندی شدند. لازم به ذکر است از آنجایی‌که این زون‌بندی عمدتاً بر اساس خصوصیات نمودارهای پتروفیزیکی تقسیم‌بندی شده است و هنوز به‌طور رسمی منتشر نشده است تحت نام زون‌بندی پتروفیزیکی معرفی می‌گردد. سپس با بررسی نمودارهای سیمان‌بندی برداشت شده در لوله‌های جداری و آستری این چاه‌ها، کیفیت سیمان‌بندی پشت لوله‌ها بررسی گردید و زون‌های مشترکی که در چاه‌های مختلف از کیفیت سیمان‌بندی مناسبی برخوردار نبودند مشخص گردید. در ادامه، دلایل کاهش کیفیت سیمان‌بندی در این زون‌ها از لحاظ خصوصیات سنگ‌شناسی، دما، فشار و نوع سیال درون این زون‌ها و نیز تأثیر طراحی مکان قرارگیری پاشنه جداری بر روی کیفیت بندش سیمان بررسی گردید. در نهایت پیشنهادهای که می‌تواند سبب بهتر شدن احتمالی کیفیت سیمان‌بندی در حفاری چاه‌های آتی گردد ارائه گردید. هدف اصلی این مقاله نشان دادن تأثیر سازندهای زمین‌شناسی (سنگ و سیال) بر کیفیت سیمان‌بندی لوله‌های جداری و آستری می‌باشد. برای این منظور پس از اعمال زونبندی پتروفیزیکی بر روی چاه‌ها، نمودارهای سیمان‌بندی برداشت شده در اکثر چاه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد که در برخی از سازندهای زمین‌شناسی واقع در میدان گازی خانگیران، تأثیر سازند و سیال درون آن سبب کاهش کیفیت بندش سیمان می‌گردد. همچنین به دلیل وجود شکستگی و تراوایی بالای برخی از سازندهای میدان خانگیران مانند سازند کلات، بهتر است در صورت امکان، طراحی مکان قرارگیری پاشنه لوله‌های جداری به‌گونه‌ای باشد که پاشنه در مرز فوقانی اینگونه سازندها قرار گیرد. اما اگر به‌دلیل مسائل حفاری، این کار مقدور نشد، پاشنه لوله جداری بسیار پایین‌تر از این زون‌های تراوا قرار داده شود به‌طوری‌که زون مذکور تقریباً در انتهای مسیر تزریق سیمان به پشت لوله‌ها واقع گردد. چراکه وجود شکستگی و تراوایی بالا سبب می‌شود بخش عمده‌ای از سیمان بدرون این سازندها هرز رفته و سازندهای فوقانی فاقد سیمان بماند. همچنین پیشنهاد می‌شود ابتدا هرزروی گل حفاری کاملاً مهار و سپس مبادرت به سیمان کاری شود. گاهاً به اشتباه تصور می‌شود که سیمان سبب کنترل هرزروی شده و نیازی به کنترل هرزروی چاه قبل از عملیات سیمان‌کاری نمی‌باشد.

زون‌بندی پتروفیزیکی سازندها

در حال حاضر در میدان خانگیران به‌جز سازند شوریجه و مزدوران در سایر سازندها زونبندی خاصی ارائه نشده است. لذا به عنوان پیش‌نیاز این مقاله، تلاش شد تمامی این سازندها تا حد امکان به زون‌های قابل تمایزی تقسیم‌بندی گردند (جدول ۱). این زون‌بندی حاصل تجربه کاری چندین ساله مؤلف بر روی میدان خانگیران است و از نتایج آن برای بررسی آماری کیفیت سیمان‌بندی زیرزون‌های سازندهای این میدان استفاده شده است. مبنای این زونبندی بر اساس مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی اعم از اطلاعات کتابخانه‌ای، اطلاعات نمودار ترسیمی زمین‌شناسی، مغزه و خرده‌های حفاری چاه‌های خانگیران، نتایج نمودارهای پتروفیزیکی اعم از سنگ‌شناسی، تخلخل، تراوایی، نوع سیال، فشار و دما، اطلاعات حفاری مانند سرعت نفوذ مته، شناسایی زون‌های مستعد هرزروی گل حفاری و زون‌های پر فشار، اطلاعات نمودارهای تولید چاه و سایر اطلاعات مرتبط با موضوع می‌باشد. در معرفی و اعمال این زون‌بندی، ابتدا عمق سرسازندها بر اساس گزارش زمین‌شناسی سرچاهی و تطابق عمقی آن با نمودارهای پتروفیزیکی تعیین شد و سپس زون‌ها بر مبنای خصوصیات نمودارهای پتروفیزیکی و سایر اطلاعات حفاری و مخزنی دسته‌بندی و معرفی گردیده‌اند.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۵۸-۴۰

جدول ۱ زون‌بندی پتروفیزیکی سازندهای زمین‌شناسی در میدان گازی خانگیران.

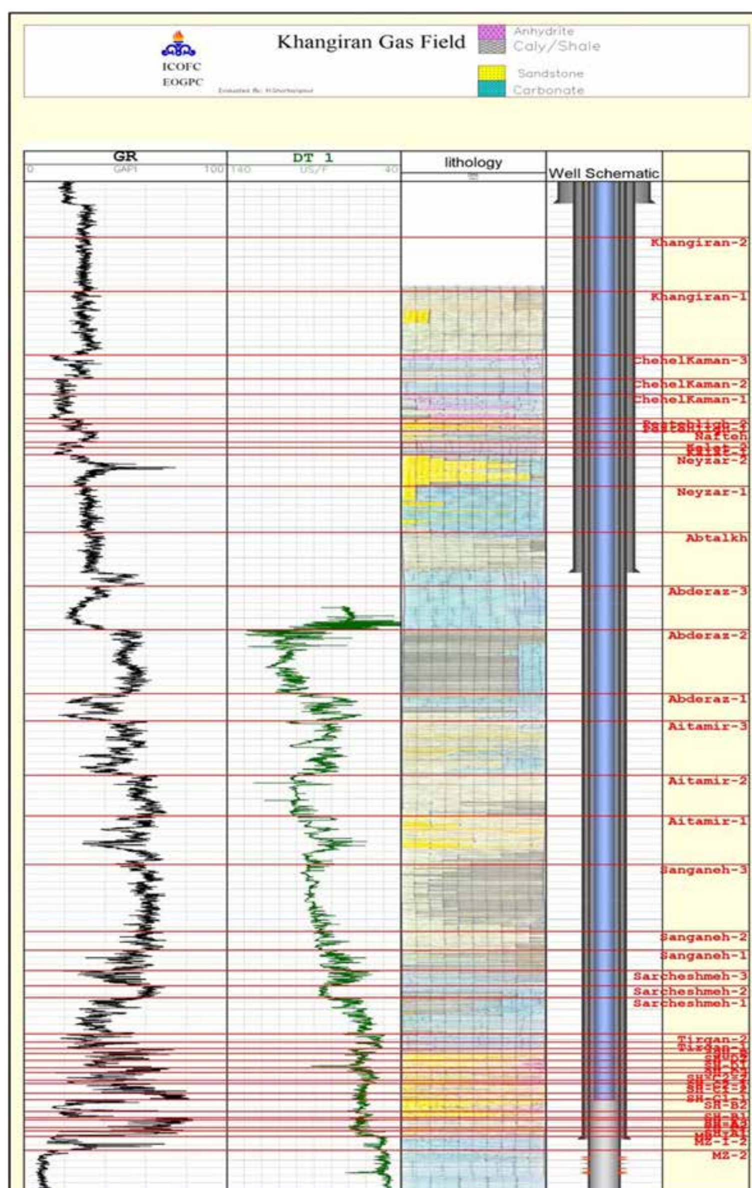
سازند	زون	سازند	زون	سازند	زون	سازند	زون
خانگیران	۱، ۲ و ۳	آیتامیر	۱، ۲ و۳		C2-1		۳
چهل کمان	۱، ۲ و ۳	سنگانه	۱، ۲ و ۳		C1-2		۴
پسته لیق	۱	سرچشمه	۱، ۲ و۳	شوریجه	C1-1	مزدوران	۵
نفته	۱	تیرگان	۱ و ۲		B1 و B2		۶
کلات	۱ و ۲		E		A1 و A2 ،A3		۷
نیزار	۱ و ۲	شوریجه	D1 و D2		۱-۱		۸
آب تلخ	۱		C3	مزدوران	۱-۲	کشف رود	۱ تا۶
آب دراز	۱، ۲ و۳		C2-2		۲		

به عنوان نمونه، سازند آبدراز به سه زون شماره ۳ (بخش کربناته فوقانی)، شماره ۲ (بخش شیلی میانی) که با یک لایه بسیارکوچک تخریبی از بخش فوقانی خود متمایز می‌شود و شماره ۱ (بخش کربناته-شیلی) زیرین تقسیم‌بندی شده است. بر اساس نمودارهای پتروفیزیکی و شواهد حفاری، در زون ۳ آبدراز برخی از چاه‌ها به میزان کمی گاز مشاهده می‌گردد و کیفیت سیمان‌بندی این زون عمدتاً ضعیف است. در سازند آیتامیر نیز که به سه زون تقسیم‌بندی شده است زیر زون‌های ۱ و ۳ دارای محتوای ماسه‌سنگی بیشتری است و زون ۲ عمدتاً شیلی می‌باشد. در سازند چهل کمان زون‌های ۱و ۳ حاوی کانی انیدریت فراوان و زون ۲ شامل یک کربنات نسبتاً تمیز است. رفتار نمودار دما در سازند چهل کمان به‌خوبی این سه زون را از هم متمایز می‌نماید. از نتایج جانبی این زون‌بندی می‌توان به شناسایی گسل خوردگی و به تبع آن تغییر شدید ضخامت در برخی از چاه‌ها مانند چاه ۴ و ۶۵ (در حدل فاصل سازند تیرگان و شوریجه) و چاه ۷۷ (در حد فاصل زون ۲ و ۳ سازند آیتامیر) و وجود احتمالی یک مرز ناپیوستگی بین زون ۲ و ۳ سازند آبدراز و مابین سازند کلات و نیزار اشاره نمود. تغییر نسبت ضخامت بین زون ۲ و ۳ آبدراز در برخی از چاه‌های خانگیران و وجود یک لایه نازک تخریبی بین این دو زون، شدت بالای نمودار گاما در قسمت فوقانی سازند نیزار، مشاهده خاک‌های دیرینه (پالئوسل) نارنجی رنگ در سطح زمین و مشاهده تراوش نفت در مرز بین سازند کلات و نیزار در سطح زمین (اطراف دهستان بزنگان)، از شواهد وجود این ناپیوستگی‌های احتمالی می‌باشد که پیشنهاد می‌گردد در این خصوص مطالعات جامع‌تری انجام گردد.

لازم به ذکر است در سازند مزدوران به‌دلیل پیچیدگی زیاد، زون‌بندی زون ۴ تا ۸ توسط موئلف هنوز تکمیل نشده است. در سازند کشف رود نیز بر اساس سه حلقه چاه حفاری شده در این میدان، زون‌بندی پتروفیزیکی انجام گردیده ولی چون نمودارهای سیمان‌بندی به دلیل قطرکم لوله آستری رانده شده در این سازند، برداشت نشده است، کیفیت سیمان‌بندی این سازند قابل بررسی نمی‌باشد. در زون‌بندی پتروفیزیکی، اکثر زیر زون‌ها به ترتیب زمان رسوب‌گذاری از قدیم به جدید با اعداد شماره‌گذاری شده‌اند. اما در سازند شوریجه و مزدوران، با توجه به شیوه متفاوت معرفی زون‌های زمین‌شناسی در گذشته [۱۰] و به منظور رعایت نظم و یکپارچگی، زون‌بندی پتروفیزیکی با حفظ اسامی گذشته، اما با جزئیات بیشتری معرفی و جانمایی گردید. به عنوان مثال، زون‌بندی زمین‌شناسی سازند مزدوران از سطح به انتها شامل زون ۱ تا ۸ می‌باشد و در زون‌بندی پتروفیزیکی این سازند، فقط

مکان هر زون در چاه‌ها بهبود یافت. زون‌های کربناته ۲ تا ۵ مزدوران مهمترین بخش‌های مخزنی این سازند می‌باشند. در سازند شوریجه نیز، زون‌های زمین‌شناسی موجود که از انتها به سطح شامل زون‌های A ،B، C1، C2، C3، D1، D2 و E می‌باشند به زون‌های پتروفیزیکی A1، A2، A3، B1، B2 ، C1-1، C1-2، C1-1، C1-2، D1، D2 و E تقسیم‌بندی گردیدند [۱۳]. هر یک از این زون‌ها خواص مخصوص به خود را دارند. به عنوان مثال، زون‌های B و D ماسه سنگی و خواص مخزنی دارند و سایر زون‌های شوریجه غیرمخزنی بوده و از ترکیب شیل، کربنات و اندکی ماسه و انیدریت تشکیل یافته‌اند. زون C2-2 در مرز فوقانی خود با یک لایه انیدریتی آغاز می‌گردد که با مکان معرفی شده از زون زمین‌شناسی C2 متفاوت است.

در شکل ۴ بخشی از ستون سنگ‌شناسی یکی از چاه‌های خانگیران که زون‌بندی فوق بر روی آن پیاده‌سازی شده است نمایش داده شده است. در این شکل به ترتیب از چپ به راست تصویر، نمودار اشعه گاما، نمودار صوتی، نتایج سنگ‌شناسی چاه که توسط زمین‌شناس سرچاه ترسیم می‌شود و شماتیک لوله‌های درون چاه نمایش داده شده است.



شکل ۴ بخشی از ستون سنگ‌شناسی یکی از چاه‌های خانگیران پس از اعمال زون‌بندی پتروفیزیکی.

بررسی کیفیت سیمان‌بندی پشت لوله‌های جداری و آستری در سازندهای مختلف

در این مرحله بر اساس نمودارهای پتروفیزیکی بندش سیمان، کیفیت سیمان‌بندی پشت لوله‌های جداری و آستری ۷۷ حلقه چاه میدان خانگیران مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور به کمک نمودارهایی مانند CBL، SBT، SBT، CAST و USIT کیفیت سیمان چسبیده به لوله‌ها و به کمک نمودارهایی مانند VDL کیفیت سیمان چسبیده به سازند مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌جز در چند مورد، در اکثر موارد کیفیت سیمان چسبیده به لوله‌ها و سازند رفتاری مشابه با هم داشتند. به عبارتی دیگر، در اکثر موارد، سیمان چسبیده به سازند و لوله‌ها متناظر با هم خوب یا بد بوده است. در جدول ۲ تعداد لوله‌های جداری و نمودارهای سیمان‌بندی برداشت شده در میدان خانگیران آورده شده است. در این تحقیق عمده نمودارهای موجود در بایگانی شرکت نفت و نمودارهای قابل ارزیابی که کیفیت داده‌های برداشت شده آن مناسب بوده‌اند، مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است.

جدول ۲ تعداد و نوع لوله‌های جداری و تعداد نمودارهای سیمان‌بندی ارزیابی شده در میدان خانگیران.

نوع لوله جداری یا آستری	”۱۳ ۳/۸	”۹ ۵/۸	”۷ جداری	”۷ آستری	”۵ آستری
تعداد لوله‌ها	۷۶	۷۷	۴۰	۳۴	۱۴
تعداد نمودارهای برداشت شده	۵	۴۶	۳۶	۳۴	۵
تعداد نمودارهای قابل ارزیابی	۲	۴۱	۲۸	۲۸	۵

در جدول ۳ کیفیت سیمان‌بندی پشت جداری و آسترهای مربوط به ۷۷ چاه خانگیران ارائه شده است. این دسته‌بندی به‌صورت کیفی می‌باشد و مبنای تعیین کیفیت بندشِ سیمانِ چسبیده به لوله‌ها، تعریف خط مبناء ثابت بر روی دامنه موج صوتی[۱] ابزار CBL و درست بودن قرائت TT[۲] در هر چاه می‌باشد. مبنای تعیین کیفیت سیمان چسبیده به سازند نیز بر اساس تغییرات شکل و وضوح رنگ موج صوتی بازگشتی از سازند است. شدت رنگ یا کنتراست نمودار VDL رابطه مستقیمی با دامنه[۳] موج بازگشتی دارد. به‌طوری‌که هرچه دامنه نمودار VDL پایین‌تر باشد، شدت رنگ کمتر است و نشان‌دهنده سیمان‌بندی خوب سازند می‌باشد. تغییر شکل امواج موازی نمودار VDL نیز شاخص مهمی برای تعیین کیفیت سینمان‌بندی می‌باشد. چنانچه این امواج با تغییرات لایه‌بندی سنگ‌ها، انحناء پیدا کند (کم یا زیاد می‌شود)، این رفتار می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت مناسب سیمان چسبیده به سازند باشد. چراکه سرعت موج در سنگ‌های مختلف متفاوت است و زمان دریافت اولین موج صوتی فشاری، تابع سرعت صوت در آن سنگ است [۱۴]. به بیانی دیگر، چنانچه شکل موج VDL، در دو لایه سنگی مجاور هم با سرعت صوت متفاوت، مانند دولومیت و انیدریت همچنان موازی بمانند، آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که سیمان بندش خوبی به سازند ندارد. لازم به ذکر است پس از ساطع شدن موج صوتی ۵ فوتی از ابزار VDL، ابتدا موج صوتی از لوله جداری و سیمان، سپس سازند و در نهایت از گل حفاری عبور و به همین ترتیب توسط گیرنده‌های ابزار دریافت می‌گردد. در سازندهایی با سرعت عبور صوت بسیار بالا[۴] (مانند دولومیت‌های ریزبلور و متراکم قسمت فوقانی زون ۱-۱ سازند مزدوران)، زمان رسیدن موج بازگشتی از سازند، زودتر از زمان گذر موج عبوری از سیمان و لوله‌ها به ابزار نمودارگیری می‌رسد و امواج نمودار VDL به سمت چپ تصویر متمایل می‌شوند.

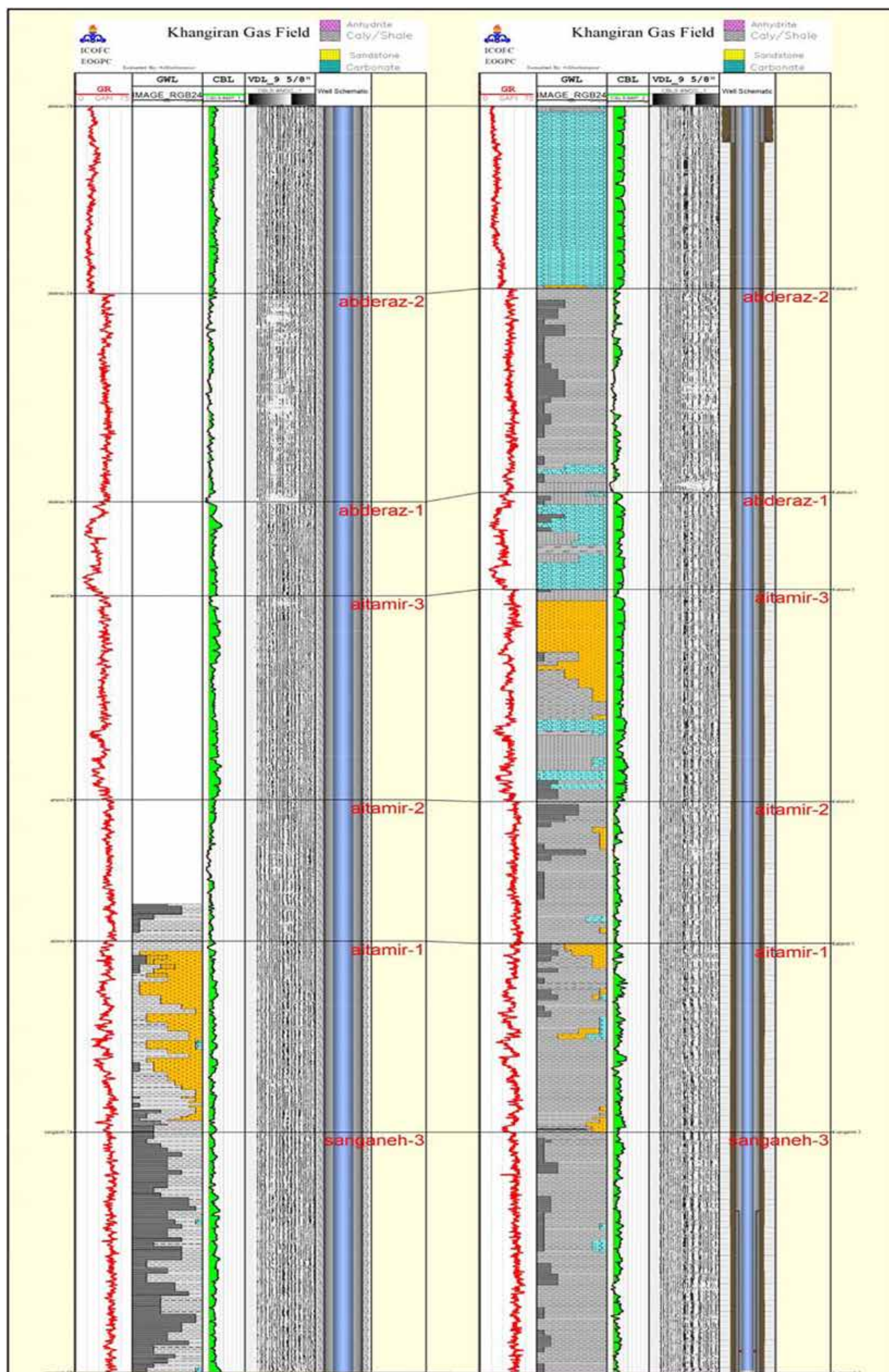
1.Amplitude
2. Transit Time
3. Amplitude
4. Fast Formation

جدول ۳ زون‌هایی که کیفیت سیمان‌بندی مقابل آنها بر اساس بررسی نمودارهای سیمان‌بندی ضعیف تشخیص داده شد.

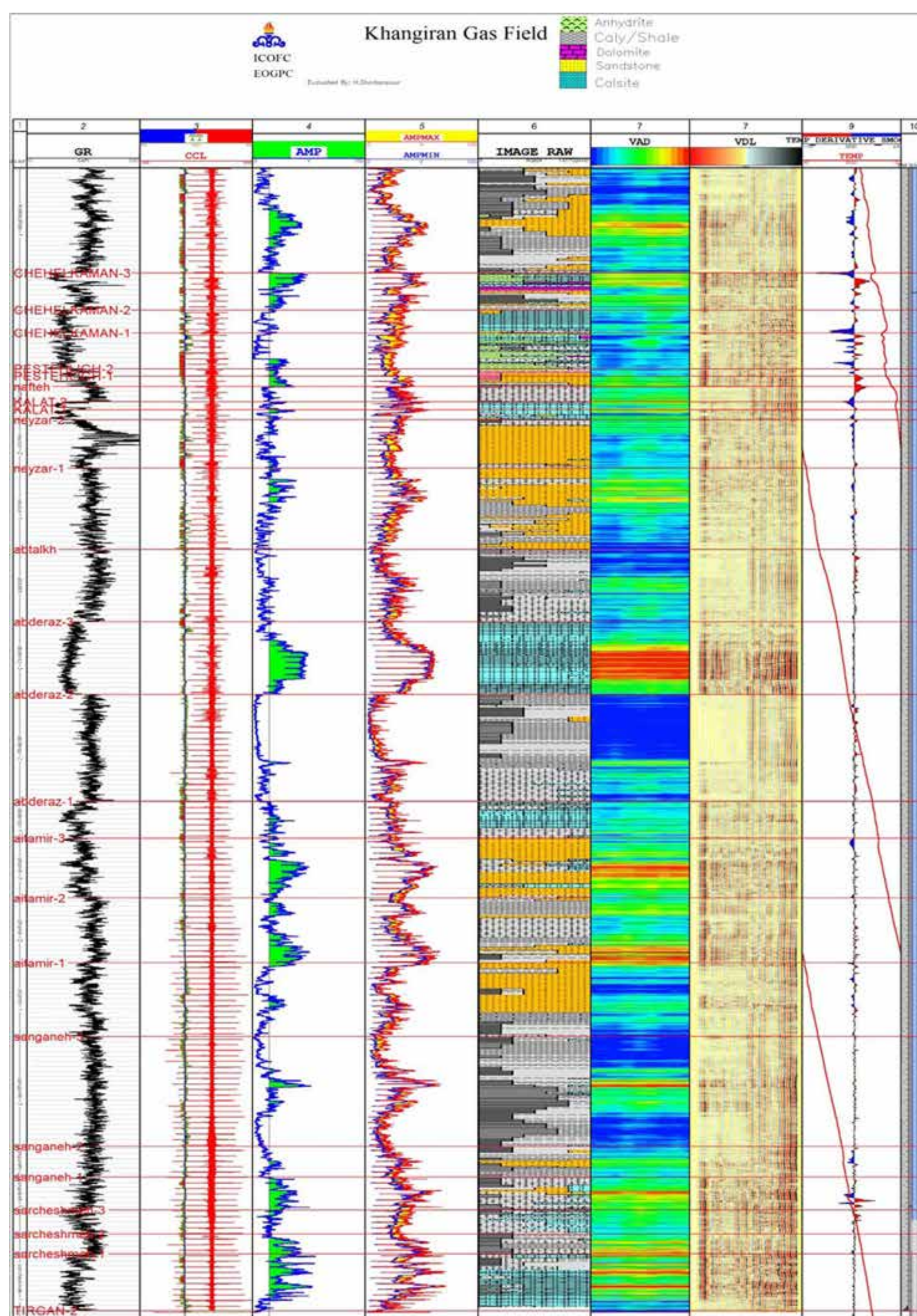
نام سازند	زون‌هایی که معمولاً از کیفیت سیمان‌بندی مناسبی برخوردار نیستند.			
	۱۳ ۳/۸"	۹ ۵/۸"	جداری یا آستری ۷"	آستری ۵"
خانگیران	۳	۱، ۲ و ۳	این سازندها در پشت لوله‌های فوق قرار ندارند.	
چهل کمان	۳	قسمت زیرین زون ۱ و زون ۳		
پسته لیق	-	۱و۲		
نفته	خوب	خوب		
کلات	۱	قسمت بالای زون ۱		
نیزار	-	قسمت بالای زون ۱		
آب تلخ	خوب	خوب		
آب دراز	-	۱ و ۳		
آیتامیر	-	۱ و ۳		
سنگانه	-	۱ و بخش میانی زون ۳		
سرچشمه	-	۱ و ۲		
تیرگان		۱	۱	-
شوریجه		B و D2	B و D2	
مزدوران	در پشت لوله‌های فوق قرار نمی‌گیرد.			

در شکل ۵ به عنوان نمونه تصویری از کیفیت سیمان‌بندی پشت جداری "۹ ۵/۸ دو چاه میدان خانگیران به‌صورت یک نیمرخ عرضی ارائه شده است. این دو چاه با اختلاف زمانی حدود ۴ سال نسبت به هم حفاری شده‌اند و کیفیت سیمان‌بندی پشت لوله‌ها در برخی زون‌ها با هم مشابه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زون‌های آبدراز ۳، آبدراز ۱ و آیتامیر ۳ کیفیت سیمان‌بندی ضعیف، در زون آبدراز ۲ و آیتامیر ۲ سیمان‌بندی خوب و در زون آیتامیر ۱ و سنگانه ۳ کیفیت سیمان‌بندی متوسط است. در نتیجه فارغ از نحوه عملیات سیمان کاری، همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌گردد کیفیت سیمان‌بندی در برخی از زون‌ها رفتاری مشابه با هم دارد.

در اکثر چاه‌های خانگیران لوله‌های جداری " ۳/۸ ۱۳ از سطح زمین تا ابتدای سازند کلات یا تا ابتدای سازند آبدراز رانده شده و در ۵ چاه این میدان نمودار سیمان‌بندی در این جداری برداشت شده است. لازم به ذکر است از آنجایی‌که داده‌های نمودار سیمان‌بندی برداشت شده فوق، عمدتاً از کیفیت مناسبی برخوردار نمی‌باشند، بررسی کیفیت سیمان‌بندی سازندهای واقع در پشت این جداری، شامل سازند خانگیران، چهل کمان، پسته لیق، نفته، کلات، نیزار و آب تلخ بر اساس اطلاعات محدودتری صورت گرفته است. لازم به توضیح است که در لوله‌هایی با قطر زیاد مانند "۱۳ ۳/۸، معمولاً نمودار سیمان‌بندی برداشت نمی‌شود. چراکه اولاً این جداری پوشاننده افق‌های غیرمخزنی فوقانی می‌باشد و ثانیاً عمده ابزارهای سیمان‌بندی بهترین عملکرد خود را در جداری‌های "۷ تا "۹ ۵/۸ دارند. اما خوشبختانه در یکی از چاه‌های خانگیران به خاطر طراحی متفاوت چاه، جداری "۱۳ ۳/۸ حذف و به‌جای آن جداری "۹ ۵/۸ از سطح زمین تا ابتدای سازند تیرگان رانده شده و نمودار RBT-VDL در آنجا برداشت گردید (شکل ۶).



شکل ۵ تصویر کیفیت سیمان‌بندی دو چاه خانگیران مربوط به پشت لوله جداری "۹ ۵/۸.



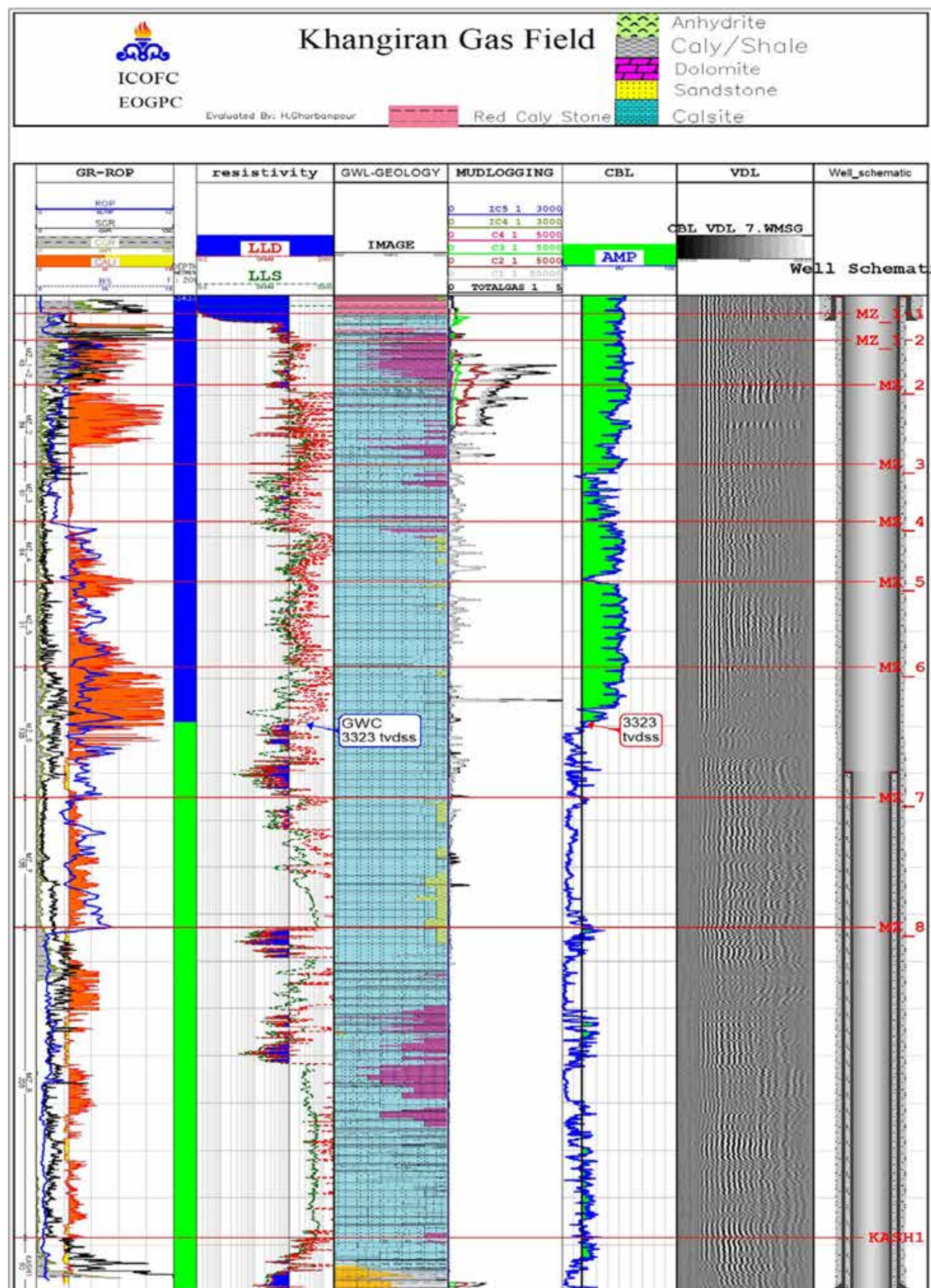
شکل ۶ کیفیت سیمان‌بندی یکی از چاه‌ها که به جای لوله "۱۳ ۳/۸، لوله "۹ ۵/۸ از سطح تا ابتدای تیرگان رانده شده است.

بنابراین برای بررسی کیفیت سیمان‌بندی در حدفاصل سازندهای خانگیران تا کلات از اطلاعات با ارزش RBT-VDL این چاه و اطلاعات CBL-VDL دو چاه دیگر که در جداری "۱۳ ۳/۸ برداشت شده و از کیفیت مناسب‌تری برخوردارند استفاده گردید. در شکل ۶ نتایج کیفیت سیمان زون‌های پتروفیزیکی از سطح زمین تا سازند تیرگان بر اساس نمودار -RBT VDL برداشت شده در جداری "۹ ۵/۸ یکی از چاه‌های میدان خانگیران نمایش داده شده است. در ستون ۲ شکل ۶ نمودار اشعه گاما، ستون شماره ۳ نمودار[1] CCL و TT [2] و ستون شماره ۴، موج صوتی نمایش داده شده است. در ستون ۴، فواصل سبز رنگ پس

1.Casing Collar Locator
2. Transit Time
3. Cement Channeling

از اعمال خط مبناء بر روی دامنه موج صوتی ابزار CBL ایجاد شده است که نشان‌دهنده کیفیت ضعیف سیمان چسبیده به لوله‌های جداری می‌باشد. در ستون ۵، حداقل و حداکثر دامنه موج صوتی بازگشتی حاصل از ابزار RBT نمایش داده شده است. فواصل زرد رنگ نشان‌دهنده عدم همگن بودن سیمان‌بندی اطراف دیواره لوله‌های جداری می‌باشد. در ستون ۶، سنگ‌شناسی فواصل حفاری شده بر اساس گزارش زمین‌شناس سرچاه نمایش داده شده است. در ستون رنگی شماره ۷، کیفیت سیمان در فواصل شعاعی اطراف لوله‌ها به تفکیک رنگ حاصل از ابزار RBT نمایش داده شده است. در این ستون، رنگ زرد و قرمز نشان‌دهنده سیمان‌بندی ضعیف، رنگ سبز نشان‌دهنده سیمان‌بندی متوسط و رنگ آبی نشان‌دهنده سیمان‌بندی خوب اطراف لوله‌های جداری می‌باشد. همان‌طور که در تصویر شکل ۶ مشخص است اولاً مشابه با نتایج چاه‌های ارائه شده در شکل ۵ در زون‌های خاصی کیفیت سیمان‌بندی در این چاه نیز ضعیف است (مانند زون آبدراز ۳) ثانیاً پدیده کانالی شدن سیمان در برخی فواصل قابل مشاهده است مانند زون ۱ سازند چهل کمان و زون ۲ سازند خانگیران. پدیده کانالی شدن در ستون ۷ به‌صورت یک رنگ ممتد سبز در بازه‌های عمقی خاصی قابل تمایز است. نمودار VDL نیز که در ستون ۸ نمایش داده شده نشان‌دهنده کیفیت سیمان چسبیده به سازند بوده که در این چاه رفتاری متناظر با نمودار CBL و سیمان چسبیده به لوله‌های جداری دارد. همچنین در ستون ۹، نمودار مشتق دمای برداشت شده پس از تکمیل و بهره‌برداری این چاه به‌صورت تفکیک رنگی (سرد شدگی آبی و گرم شدگی قرمز رنگ) نمایش داده شده است که نشان‌دهنده جریانات افقی درون سازندی یا تبادل عمودی جریانات بین لایه‌ای می‌باشد. دامنه نتایج بررسی چاه‌های میدان خانگیران نشان می‌دهد که عمدتاً در فواصل متخلخل و تروای سازند، به خصوص در فواصل حاوی گاز، کیفیت سیمان‌بندی ضعیف تا متوسط است ولی در سازندهای متراکم و شیلی کیفیت سیمان‌بندی نسبتاً خوب می‌باشد. بنابراین شاید بتوان از این نمودارها نیز جهت تشخیص برخی از فواصل متخلخل و نفوذپذیر بهره جست. به‌نظر می‌رسد دلیل اصلی سیمان‌بندی ضعیف در فواصل متخلخل، ترخیص فشار اعمالی به سیمان قبل از سفت شدن کامل آن و ورود سیال از سازندهای متخلخل به درون سیمان در حال بندش باشد. پس از پمپاژ سیمان به پشت لوله‌های جداری، به مرور که سیمان شروع به سفت شدن می‌کند، فشار هیدرواستاتیک دوغاب پشت سیمان کاهش می‌یابد و در همین زمان، گاز یا سیال پرفشار از سازندهای دارای تخلخل و نفوذپذیری وارد سیمان شده و کانال ایجاد می‌گردد. لازم به ذکر است نتایج مطالعه دیگری نشان می‌دهد [۱۵] به‌طور کاملاً بالعکس، وقتی به جهت راندن لوله آستری کوتاه[1]، در قسمت حفره باز چاه، مگنست (سیمان گچی) قرار داده می‌شود و سپس این مگنست با مته تمیز و چاه به‌صورت حفره باز تکمیل می‌گردد، در فواصل متخلخل و ریزشی، مگنست همچنان بر روی دیواره چاه باقی می‌ماند ولی در فواصل فاقد تخلخل، کاملاً از روی دیواره چاه کنده شده و شسته می‌شود. مشابه این اتفاق در سنگ نمای ساختمان قابل مشاهده است. به‌طوری‌که اگر فضای پشت سنگ نما دارای خلل و فرج نباشد، پس از مدتی سنگ از جای خود کنده شده و به زمین می افتد. در شکل ۷ تصویر یکی از چاه‌های خانگیران که نمودار CBL-VBL در درون جداری "۷ (مقابل سازند مزدوران) برداشت شده، نمایش داده شده است. نتایج بررسی این چاه نشان می‌دهد که کیفیت سیمان‌بندی در قسمت‌های فاقد تخلخل و در زیر سطح تماس آب و گاز (عمق tvdss ۳۳۲۳) سازند مزدوران خوب است ولی پس از اینکه وارد زون‌های مخزنی و گازدار فوقانی مزدوران می‌شویم (بر اساس نتایج نموادرهای Fullsuite و نمودارهای mudlogging) کیفیت سیمان‌بندی به‌شدت کاهش می‌یابد. لذا شاید بتوان از نتایج نمودار CBL-VBL نیز جهت کمک به شناسایی سطح تماس در چاه‌های مختلف کمک گرفت.

1. Cement Channeling



شکل ۷ کیفیت سیمان‌بندی سازند مزدوران در پشت لوله جداری "۹ ۵/۸

دلایل احتمالی کیفیت نامناسب سیمان‌بندی در برخی از سازندها و زون‌ها

سازند خانگیران

به دلیل ریزش شدید زون‌های شیلی و گچی در زمان حفاری و عدم برداشت نمودار قطرسنج در این سازند، معمولا حجم سیمان مورد نیاز با عدم قطعیت همراه است. ولی با این وجود معمولاً برگشتی سیمان از پشت جداری "۱۳ ۳/۸ به سطح مشاهده می‌گردد. اما نکته مهم در این سازند این است که آب موجود در گل حفاری سبب آماس کردن رس‌های گروه اسمکتیت [۱۶] موجود در سازند خانگیران شده و در اثر پوسته پوسته و سست شدن سنگ‌های دیواره چاه، سیمان چسبیده به سازند بندش مناسبی نخواهد داشت. در سه زون این سازند به‌خصوص در فواصل ماسه سنگی زیرین کاهش کیفیت بندش سیمان مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، گاهی نتایج نمودار CBL، به ظاهر

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۵۸-۴۰

بندش خوب بین سیمان و لوله‌ها را نشان می‌دهد ولی نمودار VDL کیفیت خوب سیمان چسبیده به سازند را تأیید نمی‌کند. به نظر می‌رسد در برخی از زون‌های شیلی این سازند، آماس کردن شیل و چسبیدن آن به لوله‌ها، سبب تشخیص اشتباه سیمان‌بندی خوب می‌گردد.

سازند چهل کمان

به دلیل وجود حجم بالای آب در این سازند کربناته، کیفیت سیمان‌بندی در فواصل متخلخل قسمت زیرین زون ۱ و در زون ۳ پایین است.

سازند کلات

به دلیل تراوایی بالا و وجود شکستگی‌های طبیعی (به خصوص در زون ۱) و شکستگی‌های ناشی از حفاری، سیمان تزریقی به پشت لوله‌های جداری معمولاً وارد فضاهای تراوای این سازند شده و سبب هرزروی سیمان و درنهایت، کیفیت نامناسب سیمان‌بندی در مقابل این سازند و سازندهای فوقانی آن می‌شود.

سازند آبدراز

در زون کربناته و مارنی فوقانی این سازند عمدتاً کیفیت سیمان‌بندی ضعیف است (زون ۳). دلیل این رویداد احتمالاً وجود سیال پرفشار گازی در زون ماسه سنگی (۱ الی ۲ متری) واقع در حد مرز زون ۲ و ۳ آبدراز می‌باشد که سبب کاهش چگالی سیمان و کیفیت پایین سیمان‌بندی در زون ۳ می‌گردد.

سازند آیتامیر

عمدتاً در فواصل متخلخل سازند آیتامیر به‌خصوص بخش‌های ماسه سنگی زون ۳ کیفیت سیمان‌بندی ضعیف می‌باشد.

-سازند سنگانه

عمدتاً در فواصل متخلخل این سازند به‌خصوص بخش ماسه سنگی زون ۱ کیفیت سیمان‌بندی ضعیف می‌باشد.

سازند سرچشمه

در زون کربناته-مارنی ۱ و در برخی مواقع در زون شیلی ۲ سرچشمه معمولاً کیفیت سیمان‌بندی ضعیف می‌گردد. لازم به ذکر است در برخی از چاه‌های خانگیران، گاز تزریقی به سازند شوریجه به دلیل کیفیت بد سیمان‌بندی لوله‌های جداری، از فضای پشت لوله‌ها به سمت بالا حرکت کرده و وارد برخی از سازندهای فوقانی خود از قبیل سازند تیرگان، سرچشمه و سنگانه می‌گردد. گاز وارد شده به سازند سرچشمه می‌تواند در ادامه مسیر خود با حرکت جانبی در درون لایه‌های متخلخل این سازند به اطراف محدوده چاه رسیده و در نتیجه باعث پایین آمدن کیفیت سیمان مقابل این سازند در حفاری چاه‌های اطراف گردد.

سازند تیرگان

به‌دلیل ماهیت شکننده کربنات‌های این سازند، ریزش‌های زیادی به‌صورت متقارن[1] در آن اتفاق می‌افتد. این سازند بسیار پرفشار بوده و نفت محدود موجود در آن سبب کاهش کیفیت سیمان به‌خصوص در زون ۱ و قسمت فوقانی زون ۲ در برخی از چاه‌ها شده است.

سازند شوریجه

در برخی از چاه‌های خانگیران، در بخش‌هایی از زون‌های مخزنی شوریجه، گاهاً سیمان‌بندی ضعیف است. به‌عنوان مثال بخش‌های متخلخل زون D1 و D2 و بخش زیرین زون B1. در برخی از چاه‌هایی که عمدتاً با گل پایه آبی حفاری شده‌اند، گاهاً سیمان‌بندی بخش‌های شیلی A, C, E نیز خراب است.

سازند مزدوران

در برخی از زون‌های متخلخل و نفوذپذیر برخی چاه‌ها که حاوی سیال گازی می‌باشند، سیمان‌بندی ضعیف است.

راهکارهای پیشنهادی جهت بهبود کیفیت سیمان‌بندی

اساساً سیمان‌کاری در پشت لوله‌های جداری یا آستری به

1. Breakout

دلایل اصلی ۱- جلوگیری از حرکت سیال در پشت لوله‌ها و ۲- مقام‌سازی لوله‌ها در برابر خوردگی خارجی ۳- کاهش فشار وارده از سیال درون‌سازندی به لوله‌ها ۴- کاهش فشار ناشی از آماس کردن لایه‌های شیلی و ۵- کاهش فشار ناشی ازحرکت لایه‌های تبخیری به سمت لوله‌های جداری صورت می‌پذیرد. پس از انتخاب نوع سیمان که با توجه به شرایط هرچاه (به‌خصوص دما و فشار) تعیین می‌شود، حجم دوغاب سیمان به میزان ۲۰ تا ۵۰٪ بیشتر از حجم فضای خالی پشت لوله‌ها ساخته شده و توسط پمپ تراک به درون چاه پمپاژ می‌شود. سپس با قرار دادن سیال حفاری بر روی سیمان و اعمال فشار بر آن، سیمان به فضای پشت لوله‌ها تزریق می‌گردد. اعمال فشار تا زمانی ادامه می‌یابد که تمامی سیمان به فضاهای خالی تزریق و برگشت سیمان در سطح زمین مشاهده گردد. پس از مشاهده برگشت سیمان در سطح شیرهای سطحی بسته شده و فشار پمپ تراک ترخیص می‌شود. در این زمان سیمان پشت لوله‌ها با توجه به چگالی بیشتر نسبت به گل حفاری تمایل به بازگشت به پایین و به درون فضای داخلی لوله‌ها را داشته (جریان معکوس) ولی چون در انتهای چاه یک دریچه یک‌طرفه قرار دارد (LDC[1]) سیمان در جای خود ثابت می‌ماند و پس از طی مدت زمانی خشک می‌گردد. در شکل ۱ تصویری ساده از نحوه سیمان‌کاری چاه های نفت و گاز ارائه گردید.

به‌طور کلی جدا از مسئله نیاز به استفاده از سیمان مرغوب و افزایه‌های مناسب که یک اصل اساسی در سیمان‌کاری چاه‌ها می‌باشد، سه راهکار اصلی جهت بهبود سیمان‌کاری چاه‌های میدان خانگیران پیشنهاد می‌گردد که عبارتند از ۱- تغییر عمق مکان قرارگیری پاشنه جداری، ۲- بر طرف نمودن هرزروی کامل گل قبل از شروع تزریق سیمان و ۳- حفظ فشار اعمالی توسط پمپ تراک تا حداکثر زمان ممکن. به نظر می‌رسد پس از تزریق سیمان به فضای پشت لوله‌ها و ترخیص فشار اعمالی از سوی پمپ تراک، سیال درون زون‌های متخلخل سازند بر فشار هیدرواستاتیک ناشی از وزن سیمان غلبه کرده و وارد فضای پشت لوله‌ها در مکانهای متخلخل می‌شوند که در نتیجه آن چگالی سیمان کاهش یافته و قسمتی از سیمان به بالا و پایین این زون‌های متخلخل منتقل می‌شود. لذا، در مشاهدات عینی مشاهده می‌گردد کیفیت سیمان‌کاری در برخی زون‌های متخلخل چاه‌های خانگیران ضعیف است ولی کیفیت سیمان در بالا و پایین آن زون مطلوب است. با توجه به کلیات فوق و خصوصیات زمین‌شناسی سازندهای واقع در میدان گازی خانگیران، برخی موارد پیشنهادی برای بهبود سیمان‌بندی به شرح زیر ارائه می‌گردد.

جداری "۲۰ -سازند خانگیران

-پاشنه جداری "۲۰ در انتهای سازند خانگیران حد مرز آن با سازند چهل کمان قرار داده شود و در حفاری این سازند از گل‌هایی که سبب ریزش یا آماس کردن شیل می‌گردد، استفاده نگردد.

-به منظور تخمین درست حجم سیمان مورد نیاز، پس از اتمام حفاری و قبل از جداری گذاری، قطر چاه توسط نمودارهای قطر سنج چند بازویی مانند 4arm caliper محاسبه شود.

-سیمان‌بندی مناسب جداری "۲۰، همچنین سبب کاهش خطر نشست زمین در اثر جریان یافتن احتمالی آب از اعماق پایینی در فضای پشت لوله‌های جداری به سطح زمین می‌شود.

جداری "۱۳ ۳/۸ -سازند کلات

-پاشنه جداری "۱۳ ۳/۸ دقیقاً در مرز سازند کلات و نفته قرار داده شود تا سیمان تزریقی به پشت جداری "۱۳ ۳/۸ وارد فضای احتمالی شکستگی‌های سازند کلات نشود. اگر پاشنه این جداری پایین‌تر از این سازند و به‌طور خاص پایین‌تر از زون متخلخل شماره ۱ قرار داده شود احتمال دارد بخش عظیمی از سیمان تزریقی وارد سازند کلات شده و سازندهای

1. Latch down Collar

فوقانی شامل نفته، پسته لیق و چهل کمان، فاقد سیمان بماند. اما اگر سازند کلات در پشت جداری "۹ ۵/۸ قرار داده شود، این سازند در انتهای مسیر تزریق سیمان قرار خواهد گرفت و برفرض که سیمان این حد فاصل ضعیف هم باشد، نهایتاً ارتباط فشاری بین دو لوله جداری "۹ ۵/۸ و "۱۳ ۳/۸ از منشاء سازند کلات را خواهیم داشت و در عوض از ارتباط بین سازندی جلوگیری خواهد شد. برای بر طرف نمودن ارتباط بین این دو دالیز نیز می‌توان حجم سیمان مورد نیاز برای پشت جداری "۹ ۵/۸ را بسیار بیش از نیاز لازم در نظر گرفت. و پس از اتمام سیمان کاری نیز در صورت لزوم، در سطح زمین به روش Top Job، از فضای بین دو جداری سیمان به درون چاه تزریق نمود.

- در همه لوله‌ها حتی جداری "۱۳ ۳/۸ نمودار بندش سیمان برداشت شود و ترجیحاً از ابزارهای آزیموتال که سیمان‌بندی را در ۱۸۰ درجه شعاع اطراف لوله‌ها نمایش می‌دهد استفاده گردد. مانند نمودار SBT.

- جهت تخمین دقیق دمای ستون چاه از ابزارهای نمودارگیری دما با حساسیت بالا استفاده گردد.

جداری "۹ ۵/۸ -سازند تیرگان

- پاشنه جداری "۹ ۵/۸ در ابتدای سازند تیرگان و مرز آن با سازند سرچشمه قرار داده شود.

-جهت جلوگیری از گاززدگی سیمان در سازند آبدراز، فشار پمپ تراک تا حد امکان حفظ شود. همچنین افزایه‌های سیمان به‌گونه ای انتخاب شوند که تا حد امکان زمان بندش سیمان کاهش یابد.

-در زمان حفاری سازندهای کلات تا انتهای سازند سرچشمه از گل‌های که سبب ریزش یا آماس کردن شیل می‌گردد استفاده نگردد. به‌عنوان مثال برای جلوگیری از احتمال گیر لوله‌های حفاری در سازند آب تلخ، از گل پلیمری مناسب در حفره "۱۲ ۱/۴ استفاده گردد.

جداری یا آستری "۷ -سازند شوریجه

-پاشنه جداری "۷ در انتهای زون ۱-۱ سازند مزدوران قرار داده شود.

-در زمان حفاری سازندهای تیرگان، شوریجه تا انتهای زون ۱-۱سازند مزدوران، از گل پایه نفتی یا پلیمری استفاده شود.

-از آنجایی‌که سازند تیرگان و زون ۱ مزدوران معمولا پرفشار می‌باشند و این دو بخش در طراحی پیشنهادی جداری "۷، به‌ترتیب در قسمت فوقانی و تحتانی این جداری قرار می‌گیرند. تلاش شود از سیمان سنگین و مقاوم در برابر گاز ترش برای قسمت پاشنه این جداری (محدوده زون ۱ مزدوران) استفاده شود و فشار پمپ تراک تا زمان بیشتری حفظ گردد. شایان ذکر است سیمان سنگین ممکن است سبب شکست سازند گردد، پمپاژ آن به درون چاه دشوار است و زمان بندش کوتاه‌تری نیز دارد. لذا استفاده از آن با ریسک‌های عملیاتی خاص خود همراه می‌باشد.

سازند مزدوران

-پیشنهاد می‌گردد این سازند به‌صورت حفره باز با مته "۶ ۱/۸ حفاری گردد. اما اگر افزایش تولید و توان چاه اولویت بیشتری داشته باشد، آنگاه می‌توان پاشنه جداری "۱۳ ۳/۸ را در ابتدای سرسازند آبدراز و پاشنه جداری "۹ ۵/۸ را در انتهای زون ۱-۱ مزدوران نصب و سازند مزدوران را با مته بزرگتری مانند "۸ ۱/۲ حفاری شود.

-در صورت قرارگیری چاه در محدوده پرتنش و احتمال ریزش سنگ یا بهم آمدگی ستون چاه، از لوله آستری سوراخ‌دار[1] برای پوشاندن قسمت‌های حفره باز چاه در سازند مزدوران استفاده شود [۱۷].

اساساً طراحی محل پاشنه جداری، بر مبنای دو شاخصه مهمّ، میزان فشار سیالات و فشار شکست سازند صورت می‌پذیرد. اگر فشار هیدرواستاتیک ناشی از وزن سیالات حفاری زیاد باشد، ممکن است سبب شکست سازندهای کمتر مقاوم گردد. مثلاً اگر پاشنه جداری "۱۳ ۳/۸ در ابتدای سازند کلات گذاشته شود و قرار باشد حفاری تا انتهای سازند

1. Slotted Liner

شوریجه با مته "۱/۴ ۱۲ ادامه یابد، احتمال شکست سازند نیزار با توجه به گل‌های سنگینی که برای غلبه بر فشار سازند تیرگان مورد استفاده قرار می‌گیرد زیاد است (گل تا وزن ۱۰۰ pam). بنابراین در صورتی می‌تواند از گل سبک تر استفاده نمود و سازند نیزار را با لوله جداری نپوشاند که حفاری با مته "۱/۴ ۱۲ در ابتدای سازند پرفشار تیرگان متوقف و پاشنه جداری "۵/۸ ۹ در این مکان قرار گیرد. سپس سازند شوریجه با مته "۱/۲ ۸ حفاری گردد. این روش حفاری، برای چاه‌های تولیدی از سازند شوریجه مناسب است ولی برای چاه‌های تولیدی از مزدوران چنانچه حفاری به شیوه پیشنهادی فوق برنامه‌ریزی شود، آنگاه قاعدتاً سازند شوریجه را باید با لوله جداری "۷ بپوشانیم و مزدوران را با مته "۱/۸ ۶ حفاری نمائیم که در نتیجه آن دبی تولیدی چاه نسبت به حفره "۱/۲ ۸ کاهش خواهد یافت. لازم به ذکر است طراحی و جابه‌جای محل پاشنه لوله‌های جداری تابع عوامل مختلفی است و ملاحظات دیگری از جمله زاویه چاه، مباحث اقتصادی و غیره نیز وجود دارد که اهمیت بحث سیمان را تحت شعاع خود قرار می دهد [۱۸].

نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شد تا خواننده محترم با این مطالب آشنا گردد که علاوه بر کیفیت سیمان و روش سیمان‌کاری، سازندهای زمین‌شناسی نیز برکیفیت بندش سیمان تاثیرگذار است. برای این منظور ابتدا سازندهای واقع در چاه‌های میدان گازی خانگیران زونبندی گردید و زون‌هایی که عمدتاً کیفیت سیمان‌بندی در مقابل آنها خوب یا بد است معرفی شدند. سپس دلایل احتمالی آن بررسی و در نهایت برخی از رهکارهای بهبود سیمان‌بندی ارائه گردید. اهم نتایج به قرار زیر است.

۱-عموماً در زون‌های متخلخل، پرفشار و گاز دار سازندهای واقع در میدان خانگیران کیفیت سیمان‌بندی ضعیف است و همواره زون‌های خاصی از سازندهای میدان گازی خانگیران از سیمان‌بندی مناسبی برخوردار نمی‌باشند مانند آبدراز ۳.

۲-در برخی از فواصل شیلی مانند سازند خانگیران به‌دلیل آماس کردن رس‌ها و چسبیدن آن به لوله‌های جداری، به ظاهر تصور می‌شود که سیمان‌بندی مطلوب است ولی در واقع این چنین نیست.

۳-در چاه‌های حفره باز که جهت راندن آستری کوتاه، درون ستون چاه مگنست (سیمان گچی) گذاشته و سپس حفاری و شسته می‌شود. در زون‌های متخلخل و ریزشی حفره باز چاه، مگنست به دیواره چاه چسبیده باقی می‌ماند ولی در زون‌های فاقد تخلخل از دیواره چاه کنده شده و شسته می‌شود.

۴-در چاه‌های زاویه‌دار، گاهاً نتایج سیمان‌بندی، دارای خطای زیادی می‌باشد. در این گروه از چاه‌ها، بدلیل نشست لوله‌های جداری بر روی دیواره چاه و نشست ابزار نمودارگیری بر روی سنترلایزر خود، سازند چسبیده به لوله‌های جداری یا آستری، به اشتباه به‌صورت سیمان‌بندی خوب ظاهر می‌شود.

۵-شاید بتوان از نمودارهای ارزیابی بندش سیمان جهت تشخیص برخی از فواصل متخلخل و نفوذپذیر و تعیین سطح تماس آب و گاز در چاه بهره جست.

۶-معمولاً کیفیت سیمان‌بندی در نزدیکی پاشنه لوله‌های جداری یا آستری مطلوب است ولی هر چه به سمت بالا حرکت می‌کنیم به‌دلیل ترکیب با سیال و خرده‌های سنگی سازندی از کیفیت آن کاسته می‌شود.

۷-بر اساس نتایج جانبی زون‌بندی پتروفیزیکی، احتمال وجود یک ناپیوستگی زمین‌شناسی بین زون ۲ و ۳ آب دراز و مابین سازند کلات و نیزار وجود دارد. همچنین عملکرد گسل خوردگی در سازند آیتامیر چاه ۷۷ و مابین سازند تیرگان و شوریجه چاه ۴ و ۶۵ مشهود است.

مراجع

[۱]. میرزایی ف، زمانیان ب (۱۳۹۵)، کتاب اصول سیمانکاری چاه‌های نفت و گاز، انتشارات سروش هدایت، ۳۳-۴۸.

[۲]. قجری ع، منوریان م، مجتهدی م (۱۳۹۳)، طراحی و ساخت یک نمونه دوغاب سیمان بهینه به منظور جلوگیری از پدیده مهاجرت گاز از طریق دوغاب سیمان چاه‌های گازی خانگیران، دو ماهنامه پژوهش نفت، ۲۴: ۷۷، ۱۴۸-۱۵۶.

[۳]. سلطانیان ح (۱۳۸۴)، علل مهاجرت گاز در داخل دوغاب سیمان و راه‌های درمان آن، دو ماهنامه پژوهش نفت، ۱۵: ۵۱، ۴۵-۵۳.

[۴]. سایت شرکت نمودارگیری شلمبرژر، www.slb.com.

[5]. Smith D k (1990) API oilwell cementing practices, SPE Book, SPE Monograph Series, 4, doi.org/10.4043/6210-MS.

[6]. William E, Jackson (2001) Casing and Cementing, Book, Publication by PETEX, University of Austin, Texas.

[۷]. شادی‌زاده س، صالحی م ح، جعفری آذر ا، علی محمدی ع (۱۳۸۷) بررسی دلایل بروز مشکل نشت از جداری‌ها و آستری‌های نصب شده در لایه‌های کلیدی سازند پرفشار گچساران در میادین کوپال و مارون، اولین کنگره ملی صنعت حفاری، doi:NIDIC01-003

[۸]. افشار حرب ع (۱۳۷۳) کتاب زمین‌شناسی ایران: زمین‌شناسی کپه داغ، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

[9]. Kavoosi M A, Lasemi Y, Sherkati S, Mosavi-Harami R (2009) Facies analysis and depositional sequencesof the upper jurassic mozduran formation a carbonate reservoir in the kopet dagh basin, NE IRAN, Journal of Petroleum Geology, 32, 3: 235-260, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2009.00446.x.

[۱۰]. شرکت نفتکاو (۱۳۸۹) مطالعه بروز رسانی میدان خانگیران و شرکت نفت کیش(۱۳۹۹)، مطالعه بروز رسانی میدان خانگیران.

[۱۱]. مطیعی ه (۱۳۹۹) چارت چینه‌شناسی کپه داغ.

[۱۲]. انجمن زمین‌شناسی ایران (۱۳۷۴) مچارت زمین‌شناسی ایران.

[۱۳]. قربانپور ح (۱۳۹۶) گزارش زونبندی پتروفیزیکی سازند شوریجه در میدان گازی خانگیران، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز شرق.

[۱۴]. میرزایی ف، رجبی م (۱۳۹۵) کتاب ارزیابی نمودارهای بندش سیمان، انتشارات سروش هدایت.

[۱۵]. قربانپور ح (۱۳۹۸) ارزیابی بهتر نواحی تولیدی در میدان گازی خانگیران با استفاده از مقایسه نمودار قطر سنج و اشعه گامای طبیعی سنگ برداشت شده در حین حفاری و پس از بهره‌برداری از چاه. مقاله، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۱۶۹، JR_EKTESHAF-1398-169_003.

[۱۶]. فیروزیان م (۱۳۹۱) بایواستراتیگرافی بخش تحتانی سازند خانگیران بر مبنای برش الگو، روستای یاقل، شمال شهر درگز، غرب حوضه کپه داغ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.

[۱۷]. بهاری ا (۱۴۰۰) آستری‌های شکاف دار/مشبک شده و بررسی کاربرد احتمالی آنها در دو میدان گازی ایران، مقاله، ماهنامه اکتشاف و تولید، ۱۴۰۰: ۱۹۰، 20.1001.1.25381652.1400.1400.190.4.7.

[۱۸]. رحمن م، نوری‌زادگان ه (۱۳۹۳) کتاب طراحی رشته لوله‌های درون چاهی نفت و گاز و اتصالات آن، شرکت ملی نفت، مدیریت توسعه منابع انسانی.

بهبـود عملکـرد دسـتگاه تقطیـر خورشـیدی بـا اسـتفاده از کلکتـور صفحـه تخـت

سید محمدصادق موسوی شاد[۱]، محمد مزیدی شرف‌آبادی[۲]* و اشکان عبدالی سوسن[۱،۳]
۱- گروه مهندسی انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران
۲- گروه مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
۳- گروه فنی و مهندسی، واحد آستارا، دانشگاه آزاد اسلامی،آستارا، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۲

چکیده

در این مقاله از ترکیب کلکتور خورشیدی صفحه تخت با دستگاه تقطیر خورشیدی برای نمک‌زدایی از آب استفاده شده است. هدف از این مطالعه، افزایش خروجی دستگاه تقطیر خورشیدی از طریق بهبود عملکرد با استفاده از یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت و بررسی تأثیر عمق آب بر میزان آب مقطر تولیدشده است. اثر پارامترهای مختلف، همانند عمق آب، دمای محیط، سرعت باد و تابش خورشیدی برای افزایش بهره‌وری مطالعه شده است. نتایج نشان داد که کوپل کردن یک دستگاه تقطیر خورشیدی با یک کلکتور خورشیدی، بهره‌وری را تا ۴۸٪ افزایش می‌دهد. همچنین، میزان عمق آب موجود در دستگاه تقطیر بر تولید آب مقطر مؤثر است و مشخص شد که با کاهش عمق از ۳ cm به ۲ cm میزان آب شیرین تولیدی ۸/۵٪ افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌ها نشان داد که حجم آب مقطر خروجی از دستگاه، برای عمق‌های ۲ cm تا ۴ cm به‌طور متوسط ۴/۶ تا ۵/۹ L/day با استفاده از کلکتور و ۲/۴ تا ۳/۱ L/day بدون به‌کارگیری آن است. متوسط شدت تابش و سرعت باد در طول آزمون با کلکتور به ترتیب ۱۰۳۵ W/m^2 و ۳/۷ m/s و در آزمون بدون کلکتور ۹۸۰ W/m^2 و ۴/۲ m/s بود.

کلمات کلیدی: نمک‌زدایی، کلکتور خورشیدی صفحه تخت، دستگاه تقطیر خورشیدی، آب مقطر.

مقدمه

آب یکی از منابع مهم برای بقای گونه‌های زنده بر روی زمین است. ازآنجایی‌که زمین تنها مقدار کمی منابع آب برای مصارف شرب دارد، مردم مناطق روستایی و شهری تحت تأثیر مصرف آب آلوده قرار می‌گیرند که منجر به بیماری‌های سرایت کننده از طریق آب می‌شود. حتی آب‌های زیرزمینی نیز باید قبل از استفاده برای مصرف به‌درستی تصفیه شوند. آب‌شور حاوی محتویات محلول و حل‌نشده است و ازاین‌رو برای مصارف خانگی نظیر تمیزکاری، شستشو، حمام کردن و غیره مناسب نیست [۱]. آب شیرین یکی از نیازهای اساسی انسان است و تحت تأثیر آلودگی ایجادشده توسط محصولات ساخت بشر قرار می‌گیرد. آب شیرین برای مصارف آشامیدنی و کشاورزی در دسترس انسان است. بیش

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی mazidim@ripi.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4955.3208)

از دوسوم سطح زمین با آب پوشیده شده است. با افزایش جمعیت و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پیشرفت صنعت، نوآوری‌های فناوری و حمل‌ونقل، منابع آب شیرین روی سطح زمین با نرخ بیشتری رو به اتمام است. همچنین در نواحی خشک، کوهستانی و بیابانی، بارش کم باران منجر به کمبود حاد منابع آب شیرین می‌شود. با این دلایل، نمک‌زدایی از منابع آب‌شور در دسترس از اهمیت به‌سزایی برای تولید آب شیرین در سراسر جهان برخوردار است. علاوه بر این، بحران‌های آبی، افزایش چشمگیر مصرف منابع و انرژی، به‌ویژه از زمان انقلاب صنعتی، مشکل دیگری است. سبک زندگی مدرن و رشد جمعیت، منجر به افزایش مصرف آب شیرین و انرژی شده که به‌طور اجتناب‌ناپذیری منجر به آلودگی محیط‌زیست و مشکلات کمبود سوخت می‌شود [۲]. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ به دلیل کیفیت پایین آب شیرین، بسیاری از نقاط جهان با کمبود آب آشامیدنی مواجه خواهند شد [۳]. همچنین، پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۶۰٪ آب مورد نیاز جمعیت کره زمین از طریق فرآیند نمک‌زدایی تأمین شود. نمک‌زدایی خورشیدی به دو دسته عمده نمک‌زدایی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. سیستم نمک‌زدایی مستقیم انرژی خورشیدی را استحصال می‌کند و آب‌شور را مستقیماً به آب مقطر تبدیل می‌کند. در روش غیرمستقیم ابتدا انرژی خورشیدی تبدیل به انرژی الکتریکی یا مکانیکی می‌شود و سپس این انرژی برای جداسازی مکانیکی استفاده می‌شود. روش‌های جداسازی مکانیکی عمدتاً مبتنی بر اسمز معکوس هستند. روش‌های تصفیه متعددی برای نمک‌زدایی از آب دریا ارائه‌شده است که می‌توان آن‌ها را در دو گروه اصلی فرآیندهای غشایی و حرارتی طبقه‌بندی نمود. در فرآیندهای حرارتی از فرآیند تبخیر برای تبدیل آب به بخار استفاده می‌شود و با میعان بخار تولیدی، آبی کم‌نمک تولید می‌گردد. در فرآیندهای غشایی برای جداسازی نمک‌های محلول و تولید آب شیرین، از نیروی محرکه الکتریکی یا مکانیکی و یک غشای جداکننده استفاده می‌شود. در سراسر جهان از انرژی خورشیدی غیرفعال برای واحدهای تقطیر خورشیدی به دلیل سادگی در ساخت، بهره‌برداری و هزینه کم استفاده می‌شود. آب‌شور در دستگاه ریخته و زیر نور خورشید قرار داده می‌شود. این دستگاه آب را با استفاده از گرمای خورشید تبخیر و سپس تقطیر می‌کند. این دستگاه می‌تواند آب آشامیدنی که غلظت نمک و مواد مضر برای سلامتی و سطح بهداشتی آن کم باشد را با استفاده از انرژی خورشیدی تأمین کند. از تقطیر خورشیدی می‌توان در تولید آب آشامیدنی استفاده کرد. تقطیر خورشیدی راه‌حل نسبتاً ساده برای منابع شیرین‌سازی آب‌شور است. تقطیر یکی از فرآیندهایی است که برای تصفیه آب به کار می‌رود و بدین منظور می‌توان از هر منبع گرمایی استفاده کرد. در روش تقطیر خورشیدی، با استفاده از انرژی خورشید، آب تبخیر شده و بخارآب پس از میعان به‌عنوان آب خالص استفاده می شود. استفاده از روش تقطیر خورشیدی راه‌حلی برای تأمین آب در مناطق دورافتاده می‌باشد که با کمبود آب آشامیدنی و منابع انرژی متداول مانند گرما و شبکه برق روبرو هستند [۴]. سرمستی امامی و همکاران [۵] اصول و مبانی عملکرد دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی با استفاده از منابع در دسترس را بررسی کردند و دریافتند که عواملی مانند فاصله شیشه تا سطح آب‌شور، جهت دستگاه و شیب شیشه، جنس صفحه جذب‌کننده، اختلاف دمای شیشه و سطح آب‌شور، سرعت وزش باد و دبی جرمی آب‌شور ورودی بر روی بازده دستگاه آب‌شیرین‌کن خورشیدی تأثیر دارند. در ارتباط با میزان تأثیر این عوامل نتایج متفاوتی گزارش شده است. بنابراین نیاز به طراحی و ساخت دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خورشیدی با توجه به جغرافیای منطقه امری ضروری به‌شمار می‌آید. لارنس و همکاران [۶] نشان دادند که رنگ بر عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی به‌ویژه برای

عمق زیاد آب اثر قابل‌توجهی دارد و رنگ سیاه عملکرد بهتری نسبت به رنگ‌های بنفش و قرمز دارد. میناسیان و الکراقول [۷] یک دستگاه حوضچه معمولی (نصب‌شده در سایه و دارای پوشش) را به یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی از نوع فیتیله‌ای وصل کردند تا آب‌شور پسماند داغ که از فتیله خارج می‌شود، مستقیماً به داخل آن وارد شود. نتایج نشان داد، آب مقطر تولیدی سالانه ۸۵٪ بیشتر از حوضچه معمولی و ۴۳٪ بیشتر از نوع فیتیله‌ای بود. اخیراً سینها و همکاران [۸] یک سیستم تقطیر خورشیدی را به‌عنوان جایگزین سرمایه‌گذاری برای سیستم آبگرم‌کن خورشیدی ارزیابی کردند. یک تحلیل فنی-اقتصادی برای هر دو سیستم در شرایط اقتصادی یکسان و با در نظر گرفتن ظرفیت برابر انجام شد. نتیجه‌گیری شد که هزینه انرژی حاصل از سیستم تقطیر خورشیدی بسیار کمتر از هزینه انرژی آبگرم کن است و به دلیل سرمایه‌گذاری اولیه بیشتر هزینه بهره‌برداری سالانه آبگرم کن خورشیدی بزرگ‌تر از سیستم تقطیر خورشیدی می‌باشد. قاسمی پناه و همکاران [۹] در مقاله‌ای به بررسی امکان استفاده از انرژی خورشیدی برای تصفیه و استفاده مجدد از پساب‌های نمکی پرداخته‌اند. ایده شکل‌گیری این پژوهش ازآنجا آغاز شد که باگذشت زمان، مقدار تولید آب‌های شور همراه نفت در واحدهای نمک‌زدایی از نفت خام رو به افزایش است (حدود ۵۰ m^3/h). این پساب‌ها به دلیل خصوصیات کیفی و کمی خاص که شامل نمک‌های محلول بالا (۱۷۰-۵۰ g/L)، مواد آلی فرار و غیرفرار و سایر آلاینده‌ها، مخاطره‌آمیز برای محیط‌زیست می‌باشد. آب‌شیرین‌کن خورشیدی قادر است میکروب‌ها، عوامل بیماری‌زا، فلزات سنگین و نمک‌های موجود در آب را جدا کند و آب بهداشتی و خالص تولید نماید.

انرژی خورشیدی را می‌توان توسط چندین سیستم خورشیدی متنوع مهار کرد. ساده‌ترین سیستم، جمع کننده خورشیدی است [۱۰]. علاوه بر این، با استفاده از جفت کردن یک واحد نمک‌زدایی با کلکتور لوله خلأ می‌توان گرادیان دمای بالاتری و درنتیجه بهره‌وری بیشتری را حاصل نمود [۱۱]. سودا و همکاران [۱۲] نشان دادند که نوع دو اثر حوضچه خورشیدی تقریباً ۶۵٪ عملکرد بالاتری نسبت به نوع تک اثر آن دارد. برای بازده روزانه بالاتر، اختلاف دمای بین حوضچه و پوشش شیشه‌ای باید همیشه زیاد باشد. این را می‌توان با اتصال حوضچه دستگاه به یک منبع گرمایش خارجی (کلکتور خورشیدی یا سیستم گرمای متمرکز کننده خورشیدی) و تنظیم جریان آب روی پوشش شیشه‌ای به دست آورد. آن‌ها اثر جریان آب روی پوشش شیشه‌ای و جریان آب داغ در حوضچه پایینی را از طریق یک کلکتور صفحه تخت بررسی کردند و نتیجه گرفتند که سرعت جریان آب در بالای پوشش شیشه بالایی هیچ اثر قابل‌توجهی ندارد که ممکن است به دلیل انرژی کم در دسترس در پوشش شیشه‌ای بالایی باشد. همچنین، برای جلوگیری از تلفات حرارتی، کلکتور باید در طول ساعات غیر آفتابی از حوضچه جدا شود. در سیستم یکپارچه پیشنهادشده توسط تیواری و رای [۱۳] آب بین دستگاه تقطیر خورشیدی و کلکتور به کمک پمپ کوچکی به گردش درمی‌آید. گرمای حاصل از کلکتور مستقیماً به دستگاه تقطیر خورشیدی می‌رسد و سرعت تبخیر دستگاه را افزایش می‌دهد. تولید آب روزانه ۲۴٪ بیشتر از تولید دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور است. دستگاه تقطیر خورشیدی باید به‌اندازه کافی بالا قرار گیرد تا فشار کافی برای جریان ترموسیفون ایجاد شود.

کوپر [۱۴] تأثیر زاویه شیب کلکتور را بر روی ضریب اتلاف حرارتی مطالعه کرد. مشخص شد که این ضریب با افزایش زاویه شیب کلکتور به‌آرامی افزایش و این روند تا زاویه °۶۰ ادامه می‌یابد و در این زاویه ضریب به‌شدت افزایش می‌یابد. کاظمی و سعدآبادی [۱۵] تحقیقی با عنوان تعیین زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت در تهران

انجام داده‌اند که در آن هدف خود را تعیین شیب کلکتورهای صفحه تخت رو به جنوب، در دوره‌های زمانی گوناگون، برای شهر تهران اعلام کرده‌اند. برای نیل به این هدف، ابتدا با استفاده از میانگین ماهیانه تشعشع روزانه روی صفحه افق، میزان تابش پراکنده روی صفحه افقی را با استفاده از یک مدل تجربی تعیین کرده‌اند. سپس میزان تابش را روی صفحه شیب‌دار توسط یک مدل ریاضی درشیب‌های مختلف محاسبه کرده و با مقایسه تابش درشیب‌های گوناگون، مقدار شیب بهینه ماهیانه را بر اساس بیشینه تابش °۳۵ تعیین کرده‌اند. موسی‌زاده و همکاران [۱۶] نشان دادند که راندمان یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت به پارامترهای مختلفی وابسته است. زاویه قرارگیری کلکتورهای صفحه تخت خورشیدی برای اولین بار در شهر تهران از روش آزمایشگاهی بررسی‌شده که طی چندین آزمایش، زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی برای فصل‌های مختلف سال تعیین‌شده است. برای مثال، زاویه بهینه کلکتورها در فصل تابستان و زمستان بین ۲ تا °۵۲ تعیین‌شده است.

در این مطالعه تجربی اثر کوپل کردن دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور بر روی میزان آب مقطر تولیدی و اثر سایر پارامترها نظیر تابش خورشیدی و عمق آب برای افزایش بهره‌وری دستگاه بررسی شده است. این نوع آب‌شیرین‌کن با کارآیی خاص و بهینه‌ای که برای شیرین کردن آب دارد، از مزایای مختلفی نظیر هزینه پایین، عدم نیاز به اپراتور و کارشناس متخصص جهت نگهداری، ساخت آسان و تعمیر در محل، تولید آب خالص و شیرین، عدم نیاز به تجهیزات خاص و پیچیده برای راه‌اندازی نیز برخوردار است.

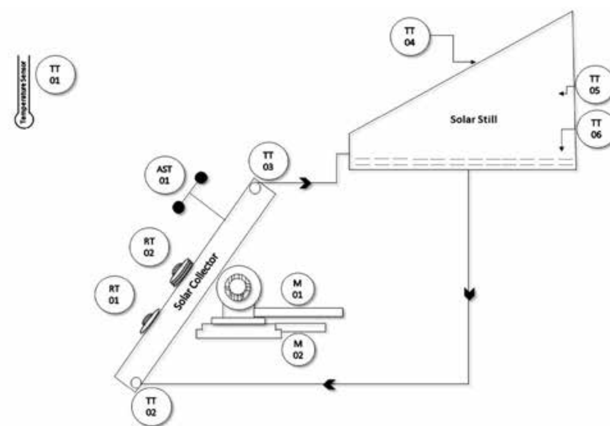
مطالعه تجربی

در این تحقیق از حوضچه‌ای به عرض 75 cm و طول 125 cm با پوشش پلیمری کف حوضچه استفاده شد. دیوارهای جانبی و کف دستگاه با پشم سنگ ($k=0/035\ W/m^2K$) به ضخامت 6 cm عایق شده است. حوضچه دستگاه خورشیدی ضد آب ساخته‌شده است تا از نشت آب جلوگیری شود و سطح داخلی برای جذب حداکثر تابش خورشیدی سیاه شده است که قبل از استفاده مدتی در آفتاب پخته شود تا رنگ از هرگونه سموم فرار آزاد شود. در غیر این صورت، این سموم همراه با آب آشامیدنی تبخیر و متراکم می‌شوند. درزگیر لاستیکی سیلیکونی برای جلوگیری از نشتی از هرگونه شکاف بین پوشش شیشه و جعبه ثابت استفاده شد. دستگاه تقطیر خورشیدی دارای یک حوضچه سیاه‌رنگ به مساحت تقریبی یک مترمربع است که با آب‌شور پرشده است. این دستگاه از یک کلکتور تخت خورشیدی که آب را از قبل گرم می‌کند تشکیل‌شده است و به‌عنوان تقویت‌کننده تابش خورشیدی عمل می‌کند. حوضه تقطیر خورشیدی با صفحه‌ای از شیشه شفاف پوشانده شده است. زاویه شیشه °۳۵ تنظیم‌شده تا آب شیرینی که در سطح زیرین آن جمع می‌شود به سمت یک گودال جمع‌آوری چکانده شود. شیشه همچنین گرما را در داخل دستگاه نگه می‌دارد. یک لوله ورودی و شناور برای تغذیه آب‌شور در دیواره عقب دستگاه تقطیر خورشیدی نصب شده است. سوراخ‌هایی در بدنه دستگاه تعبیه شد تا ترموکوپل در آن قرار گیرد. دمای سطح خارجی شیشه، دمای آب در حوضچه و دمای بخار داخل آن و همچنین دما ورودی و خروجی کلکتور اندازه‌گیری می‌شوند. نمای کلی بستر آزمون در شکل ۱ و شماتیک دستگاه در شکل ۲ نشان داده‌شده است.

مشخصات تجهیزات اندازه‌گیر موجود در بستر آزمون در جدول ۱ و مشخصات کلکتور مورداستفاده در این پژوهش در جدول ۲ آورده شده است. برنامه آبگیری حوضچه در ساعات اولیه روز قبل از رسیدن پرتوهای خورشید به حوضچه انجام می‌شد. معمولاً به مدت یک روز آب شیرین از دستگاه تولید و بعد از اتمام کار نسبت به تخلیه و شستشو حوضچه اقدام می‌شد. هر آزمون دو بار تکرار می‌شد.



شکل ۱ نمای کلی آزمایشگاه خورشیدی.



شکل ۲ شماتیک بستر آزمون.

جدول ۱ مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری

تجهیز	تگ	دقت اندازه‌گیری
دمای محیط	TT-۰۱	+۰/۰۱ °C
دمای ورودی کلکتور	TT-۰۲	+۰/۰۱ °C
دمای خروجی کلکتور	TT-۰۳	+۰/۰۱ °C
دمای شیشه	TT-۰۴	+۰/۰۱ °C
دمای بخار	TT-۰۵	+۰/۰۱ °C
دمای آب نمک	TT-۰۶	+۰/۰۱ °C
بادسنج	AST-۰۱	+/- ۰/۱ m/s
تشعشع سنج	RT-۰۱	< ۴W/m^2
تشعشع‌سنج با رینگ سایه‌انداز	RT-۰۲	< ۴W/m^2
موتور ردیاب خورشیدی (۱)	M-۰۱	-
موتور ردیاب خورشیدی (۲)	M-۰۲	-

جدول ۲ مشخصات کلکتور صفحه تخت

ویژگی‌ها	نوع/ مقدار
سطح ناخالص (m^2)	۳۲/۲
سطح جاذب (m^2)	۲۵/۲
جرم کلکتور بدون سیال (kg)	۲۰
جنس پوشش	شیشه
تعداد پوشش	۱
سیال کاری	آب

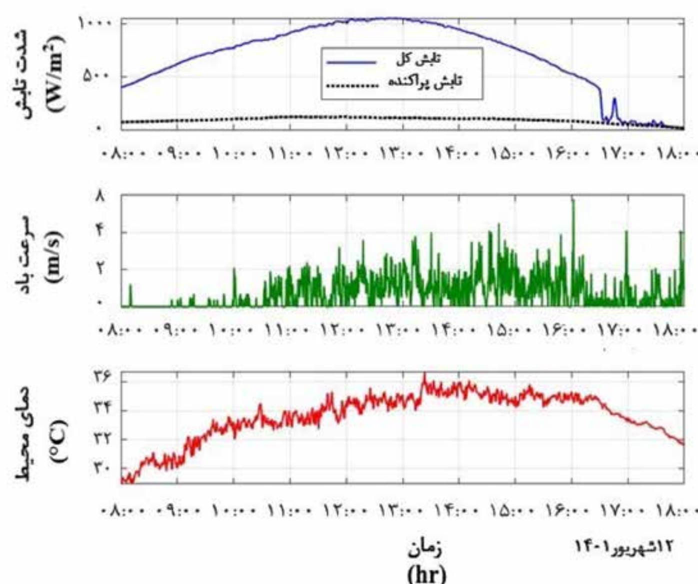
در طول انجام آزمایش‌ها در فرم‌های تهیه‌شده کلی اطلاعات لازم از قبیل وضعیت هوا، نوع آب و کیفیت آب تصفیه‌شده و مقادیر تولید آب به‌صورت روزانه ثبت می‌شد. از غروب خورشید تا طلوع آفتاب روز بعد کل حجم آب تولیدی شبانه، یک‌باره و قبل از ساعت ۸ صبح اندازه‌گیری می‌شد.

نتایج و تفسیر آن‌ها

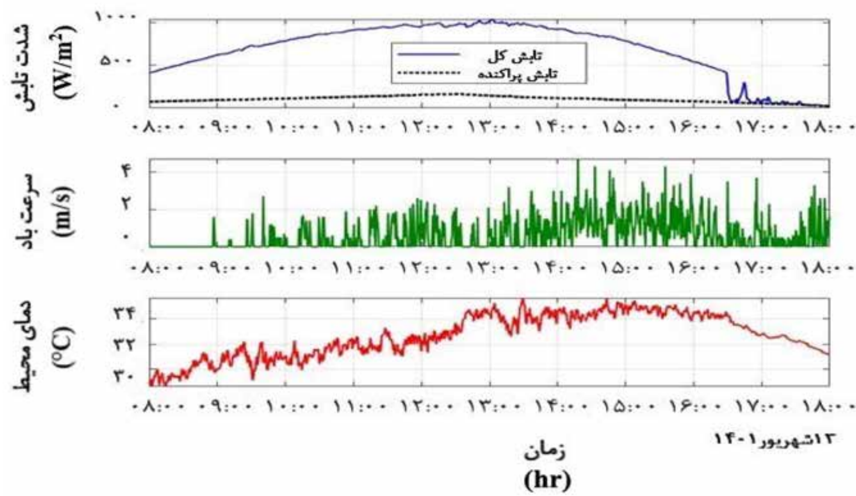
در این مقاله، دو آزمایش به‌صورت جداگانه انجام شد و نتایج آن تحلیل و بررسی شد. در آزمایش اول عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی با یک کلکتور صفحه تخت به‌طور روزانه بررسی شد و در آزمایش دوم یک دستگاه تقطیر خورشیدی به طور مستقل آزمایش شد. در این پژوهش، هر دو سیستم به مدت ۹ روز در ماه‌های شهریور و مهر سال ۱۴۰۱ در محل پژوهشگاه صنعت نفت و تحت شرایط دمایی و تابشی متفاوت به‌طور مداوم مطالعه شدند.

مطالعه کارکرد دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور در طول یک روز

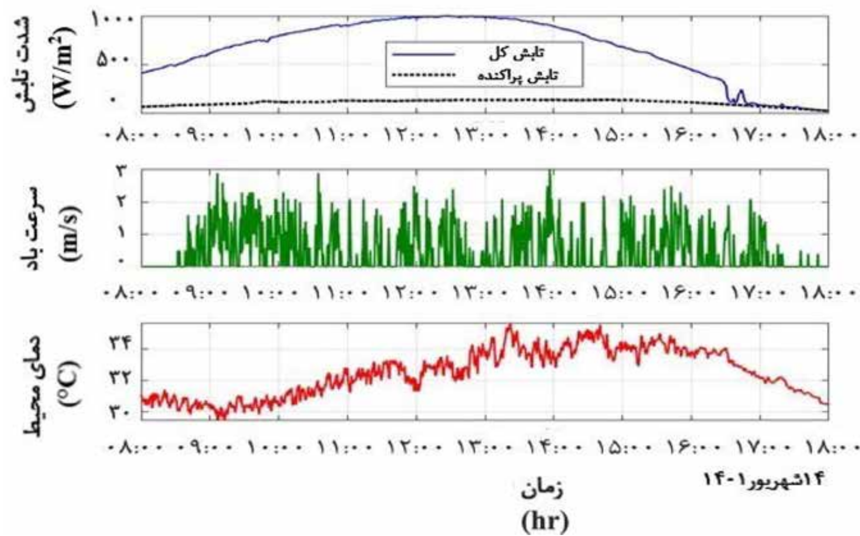
هدف از این مطالعه، بررسی میزان افزایش استحصال آب تقطیرشده به‌عنوان خروجی دستگاه تقطیر خورشیدی با استفاده از یک دستگاه کلکتور صفحه تخت می‌باشد. داده‌های عملکردی شامل دمای آب‌شور به‌عنوان ورودی دستگاه تقطیر، دمای پوشش شیشه‌ای دستگاه تقطیر، دمای آب ورودی و خروجی کلکتور و بخارات دستگاه تقطیر خورشیدی به‌طور مداوم ثبت‌شده‌اند. کلکتور روی یک صفحه زاویه‌دار نصب شد و برای تنظیم زاویه مدنظر، موتوری جهت اعمال زوایای دلخواه تعبیه گردید. با توجه به موقعیت جغرافیای محل قرارگیری بستر خورشیدی (پژوهشگاه صنعت نفت در شهر تهران) و انجام آزمون در فصل تابستان، جهت دریافت حداکثر تابش خورشیدی، کلکتور به سمت جنوب قرارگرفته و بر اساس مرجع [۱۵] زاویه شیب بهینه کلکتورهای صفحه تخت °۳۵ نسبت به افق در نظر گرفته شده است. در این آزمایش سعی بر آن شد تا میزان تأثیر شرایط دمایی و تابشی روزانه بر میزان تولید آب شیرین تولیدی دستگاه تقطیر خورشیدی و میزان اثربخشی کوپل کردن آن با یک دستگاه کلکتور خورشیدی صفحه تخت بررسی شود. تغییرات روزانه تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد برای آزمون‌های با کلکتور در روزهای مختلف در شکل‌های ۳ الی ۸ نشان داده شده‌اند.



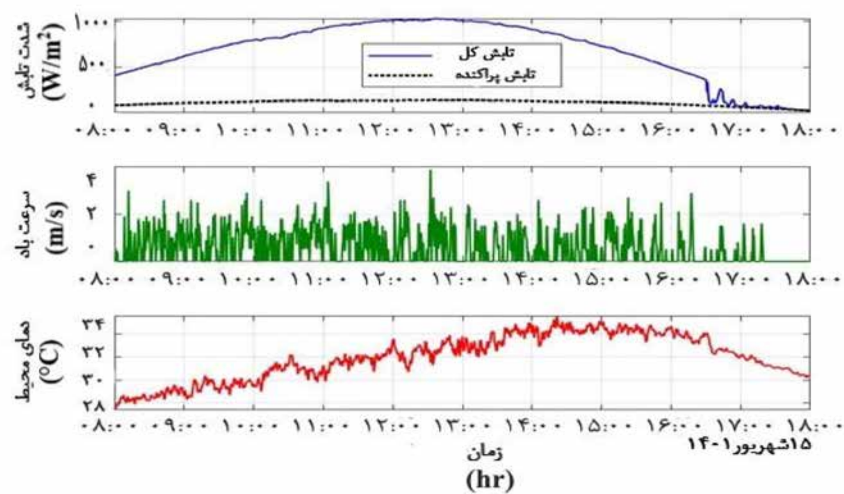
شکل ۳ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۲ شهریور.



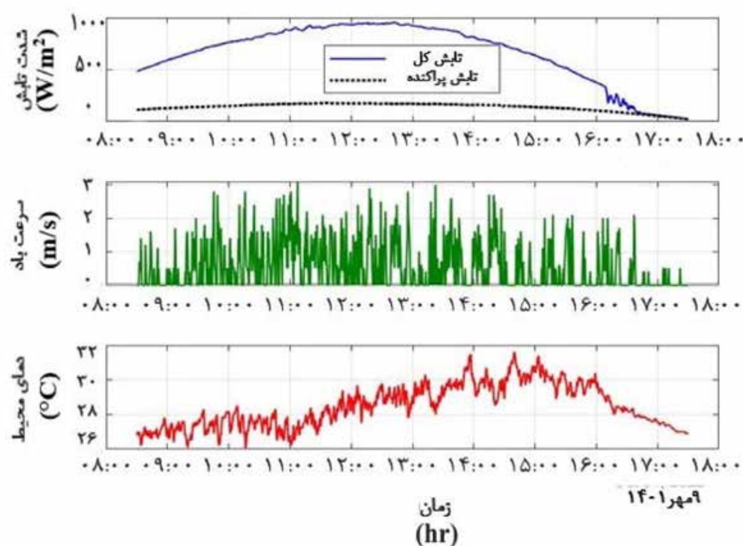
شکل ۴ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۳ شهریور.



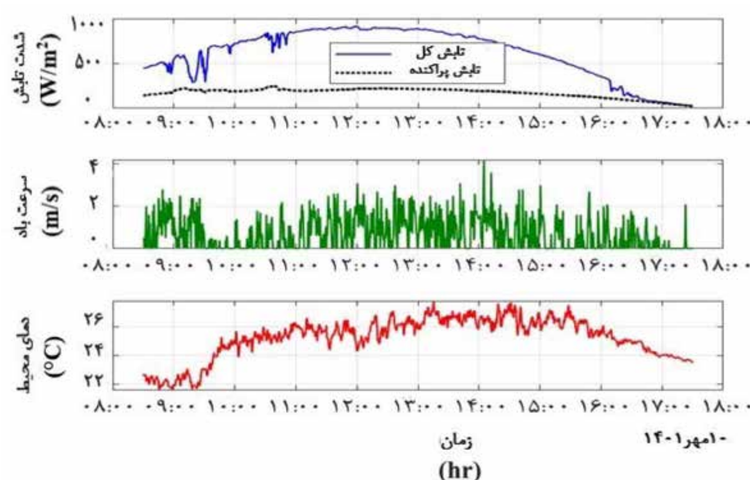
شکل ۵ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۴ شهریور.



شکل ۶ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۵ شهریور.



شکل ۷ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۹ مهر.



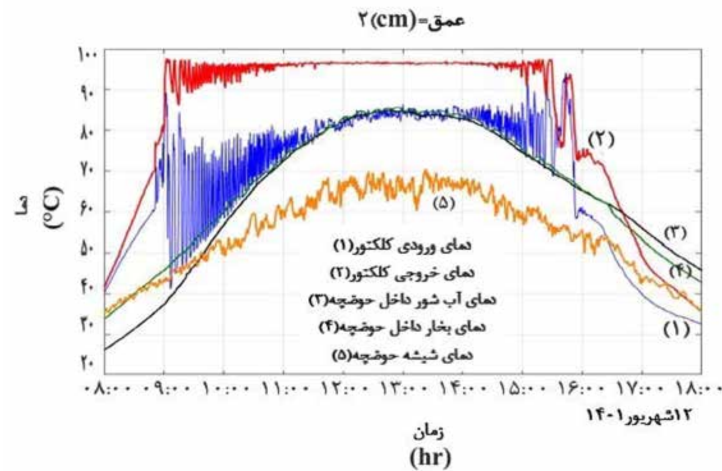
شکل ۸ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۰ مهر.

با توجه به شکل‌ها مشخص می‌شود که شدت تابش خورشید مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم کلکتور صفحه تخت می‌باشد و دمای محیط بر روی اتلافات حرارتی کلکتور، حوضچه خورشیدی و دمای سطح شیشه مؤثر است. با وزش باد، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. وزش باد اثری معکوس بر روی دمای محیط دارد. مشخصاً تغییرات دمایی محیط به‌صورت ضمنی باعث ایجاد تغییراتی بیشترین دمای محیط بین ساعات ۹ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر رخداده است که در محدوده دمایی بین ۲۷ تا ۳۷ °C بوده است. در مقادیر سایر متغیرها نیز می‌شود. دمای آب خروجی کلکتور به‌عنوان بالاترین دمای ثبت‌شده سیستم می‌باشد. همه دماها روندهای افزایش مشابهی را با افزایش تابش خورشیدی در طول روز نشان می‌دهند.

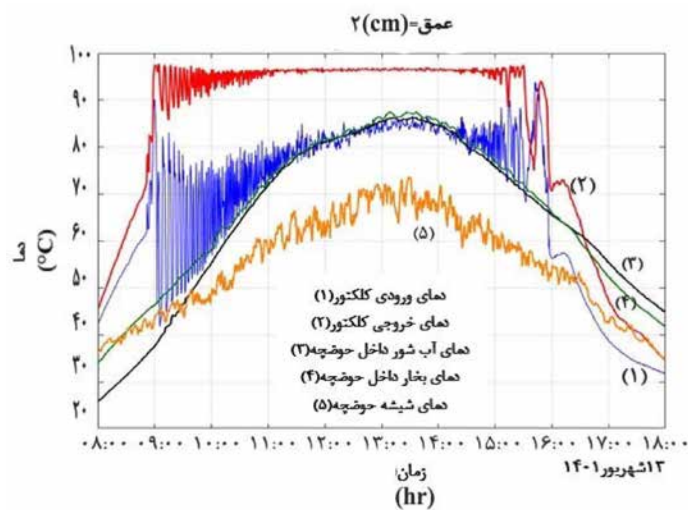
اثرات کوپل کردن دستگاه تقطیر خورشیدی با کلکتور خورشیدی صفحه تخت در شکل‌های ۹ تا ۱۴ نشان داده‌شده است.

مطالعه کارکرد دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور در طول یک روز

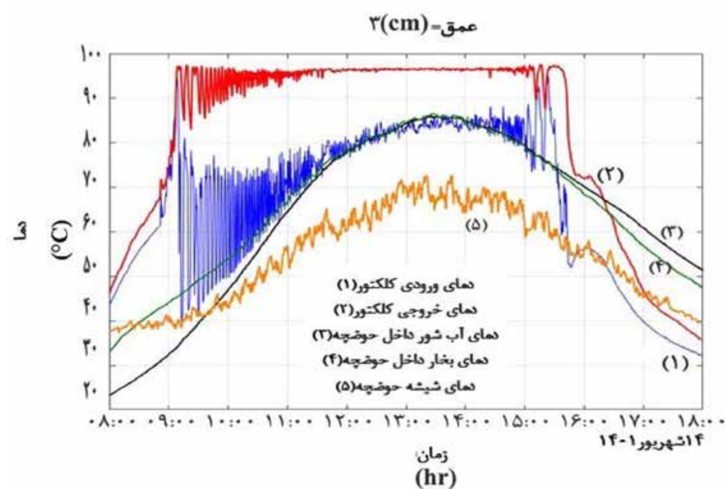
تغییرات روزانه تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد برای آزمون‌های بدون کلکتور در روزهای مختلف در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان داده شده‌اند.



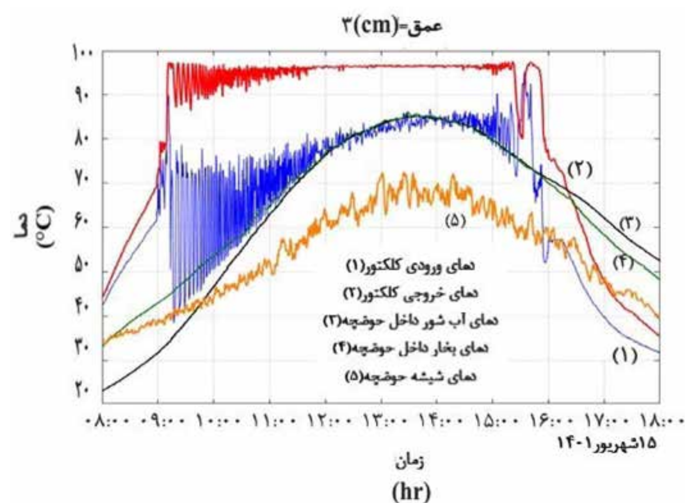
شکل ۹ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۲ شهریور.



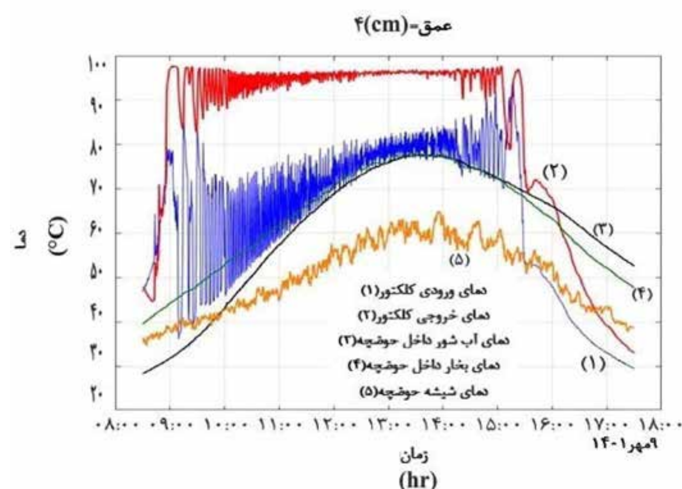
شکل ۱۰ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۳ شهریور.



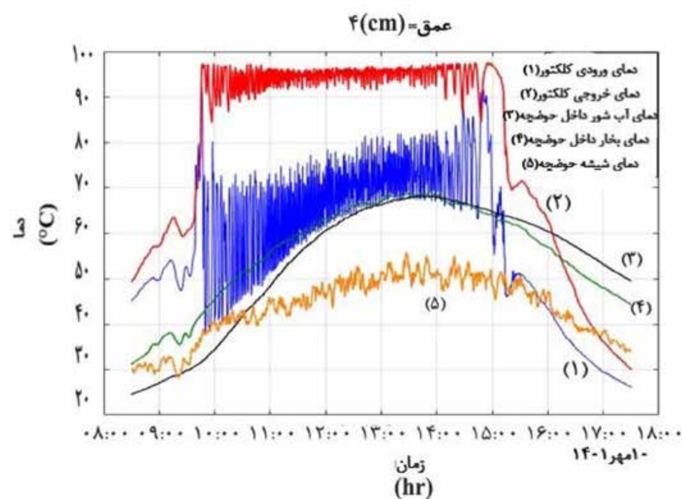
شکل ۱۱ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۴ شهریور.



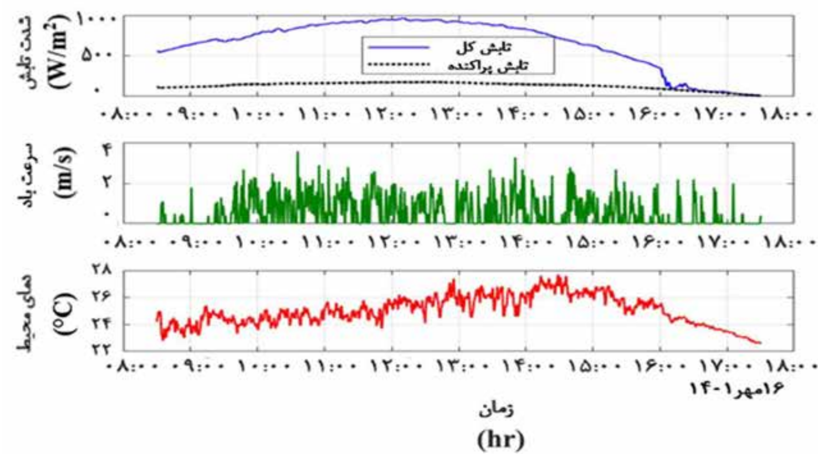
شکل ۱۲ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۵ شهریور.



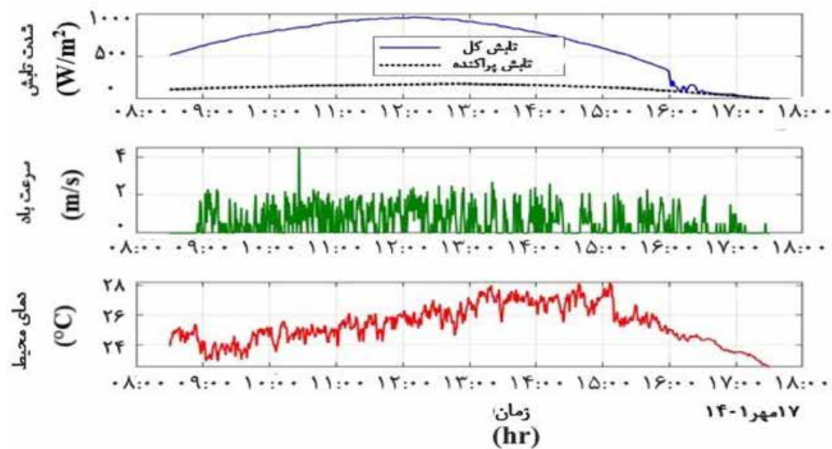
شکل ۱۳ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۹ مهر.



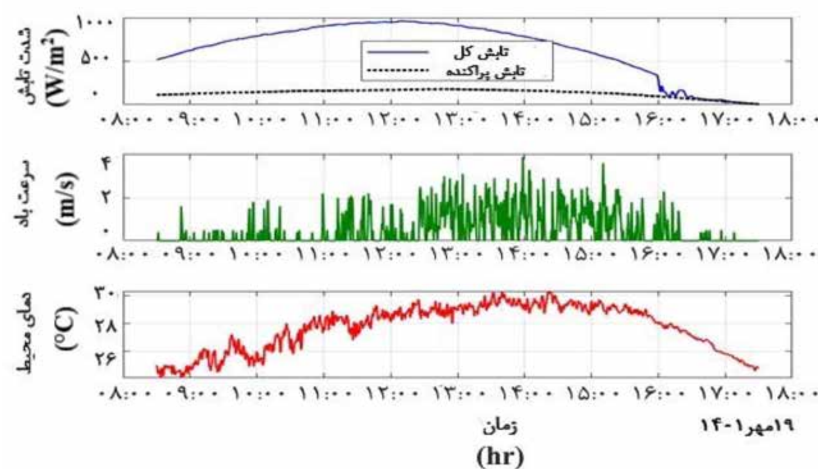
شکل ۱۴ تغییرات دمای ورودی و خروجی کلکتور، بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۰ مهر.



شکل ۱۵ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۶ مهر.



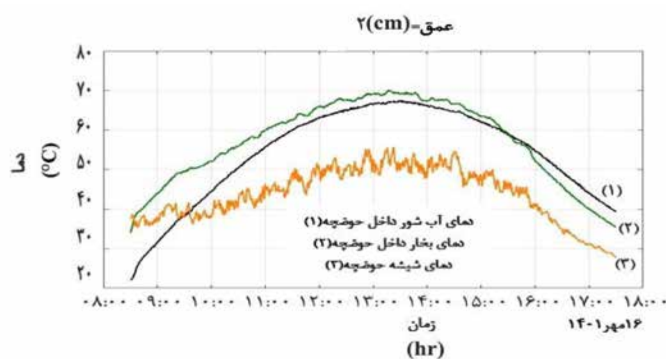
شکل ۱۶ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۷ مهر.



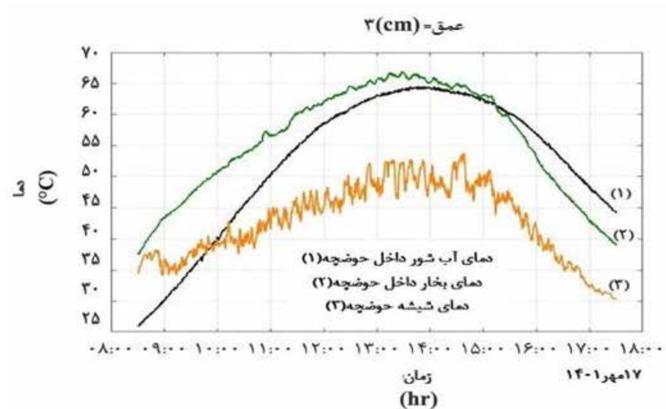
شکل ۱۷ تغییرات شدت تابش، سرعت باد، دمای محیط در طول روز ۱۹ مهر.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۷۲-۵۹

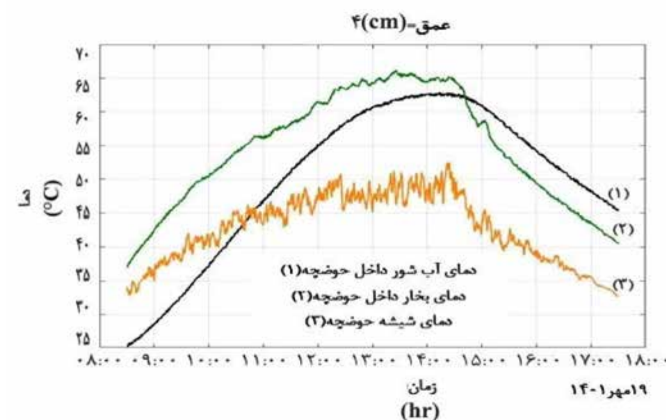
عملکرد دستگاه تقطیر خورشیدی بدون کلکتور در شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ نشان داده شده است.
همه دماها روندهای افزایش مشابهی را با افزایش تابش خورشیدی در طول روز نشان دادند. دمای بخارآب به‌عنوان بالاترین دمای ثبت‌شده سیستم می‌باشد. بیشترین دمای محیط بین ساعات ۹ صبح تا ۱۵:۳۰ بعدازظهر رخ‌داده است که در محدوده دمایی بین ۲۰ تا ۳۰ °C بوده است.



شکل ۱۸ تغییرات بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۶ مهر.



شکل ۱۹ تغییرات بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۷ مهر.



شکل ۲۰ تغییرات بخارآب، دمای آب حوضچه، دمای سطح شیشه در طول روز ۱۹ مهر.

میزان آب مقطر تولیدی و سختی آن

در جدول ۳ بـرای مقایسـه عملکـرد حوضچه‌های تقطیر خورشیدی با به‌کارگیری کلکتور و بدون آن از پارامتر میزان روزانه تولید آب برحسب لیتر استفاده شده است و مقدار آب تولیدی در عمق‌های مختلف باهم مقایسه شده‌اند. همچنین، سختی آب مقطر تولیدی با دستگاه سختی سنج مدل Lamotte TDS6 محاسبه‌شده و در جدول ۳ نشان داده‌شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود برای عمق ۲ cm آب در حوضچه‌ها میزان تولید آب تصفیه‌شده برابر ۵/۸ تا ۵/۹ L/day است. این مقدار برای عمق ۳ cm آب در حوضچه‌ها از ۵/۳ تا ۵/۴ L/day و برای عمق ۴ cm از ۴/۶ تا ۴/۸ L/day است. با توجه به نتایج مشخص است که با کاهش عمق آب، عملکرد سیستم بهتر و خروجی آب از سیستم تقطیر خورشیدی افزایش خواهد یافت. بهینه‌ترین عملکرد مربوط به عمق آب ۲ cm است.

می‌توان نتیجه گرفت که تولید آب با به کارگیری کلکتور خورشیدی و زیادشدن دمای آب حوضچه بیشتر خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد با به‌کارگیری کلکتور، دمای آب داخل حوضچه به میزان ۲۰ °C نسبت به زمانی که از کلکتور استفاده نشده است افزایش یافته و میزان آب تولیدی ۴۸٪ بیشتر شده است. ایجاد این بهره‌وری بالا درنتیجه کوپل کردن کلکتور با دستگاه خورشیدی انتظار می‌رفت. این‌گونه می‌توان تشریح کرد که کلکتور خورشیدی با گرم کردن آب تغذیه کارایی بالاتری را به فرآیند تقطیر می‌دهد.

نتیجه‌گیری

سیستم‌های تقطیر خورشیدی، دستگاه‌های نسبتاً ارزان و با فناوری پایین هستند. بااین‌حال، هنوز جای زیادی برای نوآوری و بهبود در آن‌ها وجود دارد. سیستم‌های تقطیر خورشیدی مزیت رقابتی و اقتصادی قابل‌توجهی را نسبت به سایر فرآیندهای تقطیر آب‌شور با توجه به ارزانی انرژی مصرفی و تجدیدپذیری آن در کنار سرمایه‌گذاری و هزینه نگهداری کمتر دارا می‌باشند. در این مقاله عملکرد یک دستگاه تقطیر خورشیدی به همراه یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت بررسی شد و با عملکرد یک دستگاه تقطیر خورشیدی مستقل مقایسه گردید. مشخص شد که بهره‌وری دستگاه تقطیر خورشیدی کوپل شده با کلکتور ۴۸٪ بیشتر از دستگاه تقطیر خورشیدی مستقل است. می‌توان نتیجه گرفت که ازجمله مهم‌ترین دلایل این افزایش بهره‌وری افزایش دمای بالاتر آب حوضچه دستگاه می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از جناب آقای دکتر غیاثی رئیس محترم واحد مهندسی و خدمات فنی پژوهشگاه صنعت نفت و مهندس کردی مسئول محترم طرح پژوهشکده توسعه و بهینه‌سازی فناوری‌های انرژی که در طول انجام این تحقیق یاری‌رسان بودند ابراز می‌دارند.

مراجع

[1]. Kaushal A)2010 (Solar stills A review, Renewable and sustainable Energy Reviews, 14, 1: 446-453, doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.011.

[2]. Abujazar MSS, Fatihah S, Kabeel A, (2017) Seawater desalination using inclined stepped solar still with copper trays in a wet tropical climate, Desalination, 423: 141-148, doi.org/10.1016/j.desal.2017.09.020.

[3]. Kumar S, Tiwari A, (2008) An experimental study of hybrid photovoltaic thermal (PV/T)-active solar still, International Journal of Energy Research, 32, 9: 847-858, doi.org/10.1002/er.1388.

[4]. Yahya MA, Al-Qodah Z, Ngah CZ, (2015) Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production, A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 46: 218-235, doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051.

[۵]. امیری حمزه ق ر (۲۰۱۸) بررسی اثر تنش شوری بر ترکیب های شیمیایی اسانس گیاه مرزه رشینگری،

مجلـه پژوهش‌هـای گیاهـی (مجلـه زیسـت شناسـی ایران)(علمـی)، ۲، ۳۱: ۲۵۷-۲۴۸، doi: 20.1001.1.23832592.1397.31.2.4.2.

[6]. Lawrence S, Gupta S, Tiwari G, (1988) Experimental validation of thermal analysis of solar still with dye, International journal of solar energy, 6, 5: 291-305, doi.org/10.1080/01425918808914235.

[7]. Fath HE, (1998) Solar distillation a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment, Desalination, 116, 1: 45-56 .

[8]. Sinha S, Kumar S, Tiwari G, (1994) Active solar distillation system—An investment alternative to a solar hot water system, Energy Conversion and Management, 35, 7: 583-588.

[۹]. کریـم ق پ (۱۳۹۳) بررسـی تصفیه‌پذیـری پسـاب واحدهـای نمک‌زدایـی نفـت خـام بـه روش تقطیـر خورشـیدی، ۲۴، ۷۸، ۹۱-۸۴.

[10]. Ghorbani B, Mehrpooya M, Sadeghzadeh M, (2018) Developing a tri-generation system of power, heating and freshwater (for an industrial town) by using solar flat plate collectors, multi-stage desalination unit and Kalina power generation cycle, Energy Conversion and Management, 165: 113-126, doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.040.

[11]. Chong TL, Huang BJ, PH Wu, Kao YC, (2014) Multiple-effect diffusion solar still coupled with a vacuum-tube collector and heat pipe, Desalination, 347: 66-76, doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.023.

[12]. Sodha Ms, Nayak JK, Tiwari GN, Kumar A, (1980) Double basin solar still. Energy Conversion and Management, 20, 1: 23-32, doi.org/10.1016/0196-8904(80)90025-4.

[13]. Rai S, Tiwari G, (1983) Single basin solar still coupled with flat plate collector, Energy Conversion and Management, 23, 3: 145-149, oi.org/10.1016/0196-8904(83)90057-2.

[14]. Cooper P, (1981) The effect of inclination on the heat loss from flat-plate solar collectors, Solar Energy, 27, 5: 413-420, doi.org/10.1016/0038-092X(81)90006-2.

[15]. Jafarkazemi F, Ali Saadabadi S, Pasdarshahri H, (2012) The optimum tilt angle for flat-plate solar collectors in Iran, Journal of Renewable and Sustainable Energy, 4, 1: 013118, doi.org/10.1063/1.3688024.

[16]. Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, (2009) A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 8: 1800-1818, doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022.

تعیین پارامترهای مخزنی بخش بالایی سازند دالان با استفاده از مغزه و لاگ NMR در میدان نفتی پارس‌جنوبی

محمد باقر براتی دیز[۱]، علی کدخدایی[۲]، بهمن سلیمانی*[۱]، فاطمه صابری[۳] و پوریا آسوده[۳]

۱- گروه زمین‌شناسی نفت و حوضه‌های رسوبی، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

۳- گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم‌زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۰

چکیده

تعیین پارامترهای مخزنی دارای اهمیت زیادی است که به‌طور معمول در آزمایشگاه انجام می‌پذیرد اما هزینه‌بر، زمان‌بر و مشکل است. بنابراین در این پژوهش، از لاگ NMR برای تعیین تخلخل، تراوایی، فشار موئینه در بخش بالایی سازند دالان در چاه SP-A میدان گازی پارس جنوبی استفاده شده است. در این روش از طریق توزیع T_2 به‌دست آمده از لاگ NMR فشار موویینه محاسبه و در مقابل S_w ترسیم شد. همچنین، مقایسه داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه و لاگ NMR تطابق خوبی با ضریب همبستگی حدود ۰/۹۳ و ۰/۹۸ برای زون مخزنی K4 نشان داد. براساس ارزیابی نمودارهای چاه‌پیمایی و تفسیر داده‌ها توسط نرم‌افزار تِک لاگ نشان داده شد که فاصله مورد مطالعه دارای میانگین تخلخل کل ۱۵/۵۵٪ و میانگین تخلخل مؤثر ۱۱/۹٪ می‌باشد، همچنین، حجم شیل پایین و تخلخل مناسب نشان داد که استعداد مخزنی زون مورد مطالعه بالا می‌باشد.

کلمات کلیدی: پارامترهای مخزنی، لاگ NMR، سازند دالان، میدان گازی پارس‌جنوبی، نرم‌افزار تک لاگ

مقدمه

تشدید مغناطیس هسته‌ای برای اولین بار در هسته‌های هیدروژن، توسط Purcell و Block مشاهده شد و از آن زمان به‌طور گسترده برای تعیین ویژگی‌های مواد به‌کار رفته است [۱-۴]. بنابراین نمودار مغناطیسی هسته‌ای (NMR (Nuclear Magnetic Resonance به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم نمودارگیری در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفته است [۵-۶]. ابزارهای نمودارگیری NMR اساساً با سایر ابزارهای نمودارگیری از قبیل نوترون، دانسیته و ابزارهای صوتی که توسط تمام اجزاء سنگ مخزن تحت تأثیرند، متفاوت می‌باشند. علاوه‌براین، ابزارهای NMR قادرند تا به‌کمک تغییرات موجود در منحنی‌های پراکندگی T_2 نوع هیدروکربن موجود در مخزن را شناسایی و برخی از خواص آن از قبیل دانسیته را مشخص کنند [۷- ۸].

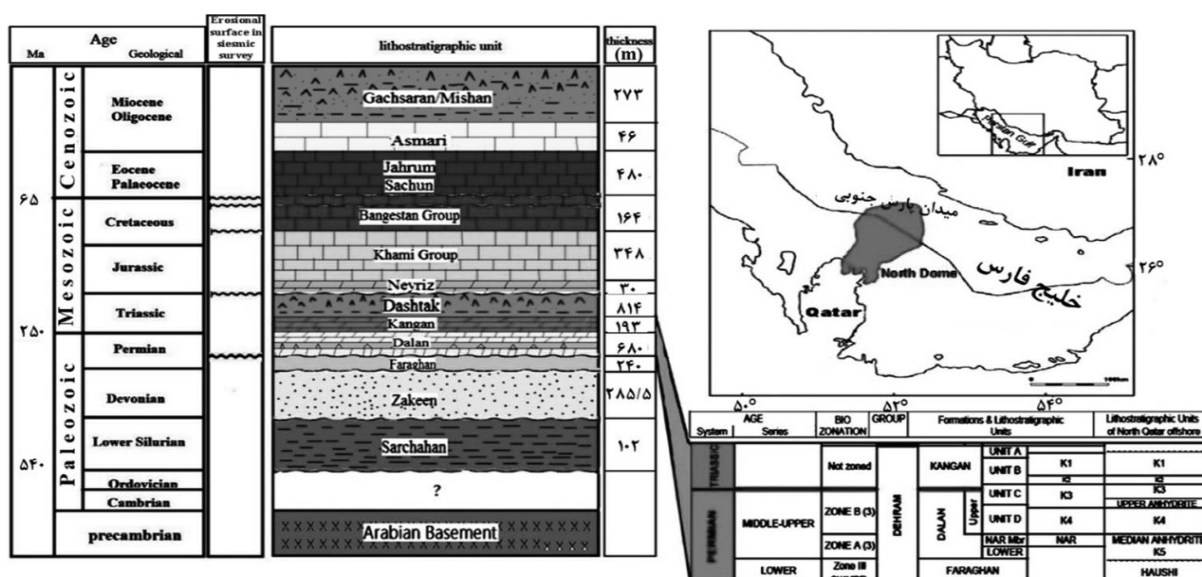
*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی soleimani_b@scu.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4546.3052)

پژوهش نفت
شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۸۳-۷۳

همچنین، دیگر خروجی‌های پتروفیزیکی مانند تراوایی، فشار موئینه، اشباع شدگی آب و هیدروکربن، ترشدگی، شناسایی حفرات، شکستگی‌ها و اندازه دانه‌ها در سنگ مخزن از طریق این نمودار پتروفیزیکی قابل اندازه‌گیری است [۹-۱۰]. در این میان، مطالعات متعددی از نمودار NMR صورت گرفته است از جمله مردانی و رضایی [۱۱] نشان داد که تخلخل حاصل از لاگ NMR، مستقل از لیتولوژی سازند اندازه‌گیری می‌شود. این لاگ قادر است انواع تخلخل‌ها را از هم تشخیص دهد و برای حصول تخلخل از این لاگ نیازی به استفاده از روابط خاصی ناست که نشانه ساده‌تر بودن این روش و درصد اطمینان بالاتر آن می‌باشد. زارعی و همکاران [۱۲-۱۳] نشان دادند که تراوایی حاصل از Timur با تراوایی مغزه تطابق بیشتری نسبت به تراوایی حاصل از SDR دارد که دلیل آن حساسیت مدل SDR به‌حضور هیدروکربن سبک می‌باشد. همچنین، لبانی و همکاران [۱۴] و کدخدایی و همکاران [۱۵] به نتیجه رسیدند که لاگ NMR راه حل مناسبی برای تخمین پارامترهای مخزنی به‌نظر می‌رسد. روش NMR ما را قادر می‌سازد تا اطلاعاتی در مورد توزیع اندازه و منافذ گلوگاه و حجم آن‌ها به‌دست آوریم [۱۶-۲۰]. در این مطالعه برای شناخت بیشتر ویژگی‌های مخزنی از قسمت بالایی سازند دالان به سن پرمین پسین با نام واحد K4 که در میدان گازی پارس‌جنوبی واقع شده است از کلیه اطلاعات اعم از زمین‌شناسی، پتروفیزیکی استفاده شده است اما تخمین تخلخل و تراوایی با استفاده از روش مغزه‌گیری برای تمامی میدان‌های نفتی امکان‌پذیر نمی‌باشد. از سوی دیگر، استفاده تلفیقی از روش‌های مغزه‌گیری و NMR برای تمامی میدان‌های نفتی به‌دلیل هزینه‌های بالای آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا ضروری است که از تکنیک‌های ساده، کم هزینه و راهبردی استفاده نمود. تکنیک مورد نظر در این پروژه استفاده از داده‌های NMRهای انجام شده در مخزن نفتی پارس‌جنوبی است و با داده‌های آنالیز مغزه استفاده و تلفیق شده است تا آگاهی و شناخت دقیق‌تری از ویژگی‌ها و خصوصیات مخزن (تخلخل و تراوایی) و در نتیجه پتانسیل مخزنی بخش مورد نظر به‌دست آید.

ناحیه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از میدان گازی پارس جنوبی است که بین کشورهای ایران و قطر مشترک است. این میدان در ۱۰۵ کیلومتری جنوب غربی بندر عسلویه و در آب‌های مشترک سرزمین ایران و قطر واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱ موقعیت، زون‌بندی و لیتولوژی میدان پارس‌جنوبی در خلیج فارس [۲۱]

روش کار

مغزه‌های مربوط به چاه SP-A از قبل توسط پژوهشگاه صنعت نفت تهران مورد بررسی قرار گرفته بود و داده‌های تخلخل، تراوایی و فشار موئینگی حاصل از تزریق جیوه در آزمایشگاه محاسبه و در اختیار بوده است (جدول ۱). (همان‌طور که اشاره شد با توجه به اهمیت مخزنی زون K4 تاکید مطالعات انجام شده در این پژوهش برروی این زون صورت گرفته است).

تبدیل داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از مغزه به شرایط مخزن

سیالات و شرایط آزمایش، با آنچه در مخزن رخ می‌دهد، تفاوت دارد. بنابراین لازم است که نتایج آزمایشگاهی با شرایط مخزن، هماهنگ شوند. در این مقاله برای اندازه‌گیری فشار موئینگی از سیستم هوا- جیوه استفاده شده است درحالی‌که در شرایط مخزن، سیستم آب- نفت برقرار است. لذا، اگر فرض شود که تخلخل و نفوذپذیری اندازه‌گیری شده نمونه سنگ تحت آزمایش، بیانگر تخلخل و نفوذپذیری واقعی مخزن باشد.

جدول ۱ تخلخل، تراوایی و فشار موئینگی حاصل از تزریق جیوه در آزمایشگاه در زون K4

تخلخل مغزه	تخلخل NMR	تراوایی مغزه	تراوایی NMR
۰/۱۶	۰/۱۷	۳۰۷	۳۰۵
۰/۱۷	۰/۱۶	۲۳۰	۲۳۰
۰/۱۵	۰/۱۴	۲۳۰	۲۱۰
۰/۲۳	۰/۲۱	۱۸۴	۱۸۴
۰/۲۴	۰/۲۲	۱۵۷	۱۵۷
۰/۲۳	۰/۲۱	۱۳۰	۱۴۰
۰/۲۵	۰/۲۳	۱۱۷	۱۳۰
۰/۲۵	۰/۲۵	۱۱۰	۱۲۰
۰/۲	۰/۲	۱۰۹	۱۰۰
۰/۱۷	۰/۱۹	۸۰	۱۰۰
۰/۱۵	۰/۱۴	۸۷	۸۷
۰/۱۸	۰/۱۸	۸۰	۸۰
۰/۱۶	۰/۱۶	۶۶	۶۵
۰/۱۵	۰/۱۴	۳۵	۵۰
۰/۱	۰/۱	۴۰	۳۳
۰/۱۴	۰/۱۲	۳۵	۳۵
۰/۱۵	۰/۱۶	۱۴	۲۵
۰/۱۴	۰/۱۴	۱۴	۲۴
۰/۱۴	۰/۱۳		
۰/۱۴	۰/۱۳		
۰/۱۳	۰/۱۱		
۰/۱۵	۰/۱۴		
۰/۱۱	۰/۱		
۰/۱۲	۰/۱۲		
۰/۱۳	۰/۱۳		

فشار موئینگی در شرایط مخزن، به‌صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۲]:

$$(P_C)_R = \frac{\delta_{res}\cos\theta_{res}}{\delta_{lab}\cos\theta_{lab}} \times (P_C)_L \quad (۱)$$

δ_{res}: کشش سطحی و بین سطحی سیالات در مخزن (dyne/cm)

δ_{lab}: کشش سطحی و بین سطحی سیالات در آزمایشگاه (dyne/cm)

θ: زاویه تماس (°)

$(P_C)_R$: فشار موئینگی در شرایط مخزن (psi)

$(P_C)_L$: فشار موئینگی در شرایط آزمایشگاه (psi)

اما اگر کل افق مخزنی تحت آزمایش تزریق جیوه قرار گیرد زمان و هزینه زیادی می‌تواند مصرف شود. لذا ضروری است که از تکنیک‌های ساده، کم هزینه و راهبردی استفاده شود. تکنیک مورد نظر در این پژوهش، استفاده از داده‌های NMR انجام شده در مخزن نفتی و تعمیم آن به کل میدان نفتی می‌باشد. در این پژوهش ابتدا تخلخل و تراوایی با استفاده از NMR تعیین می‌شود و سپس فشار موئینگی با کالیبره کردن داده‌ها به‌دست می‌آید [۲۲].

تخمین تخلخل از طریق لاگ NMR

برای تعیین تخلخل با استفاده از NMR ترسیم دامنه‌های میرایش اکوها به‌عنوان تابعی از زمان، منحنی‌ای ایجاد خواهد کرد که اولین دامنه اکوی اسپین ثبت شده، در ارتباط با کل هسته‌های هیدروژنی است که در سیالات داخل منافذ قرار دارند. بنابراین این دامنه می‌تواند شاخصی از تخلخل باشد [۲].

تخمین تراوایی از طریق لاگ NMR

تراوایی یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخازن هیدروکربنی است که تخمین صحیح آن برای مهندسین نفت دارای اهمیت زیادی می‌باشد زیرا در پیدا کردن راه حل‌هایی برای بالا بردن بازیافت نفت، تعیین حجم درجای مخازن نفت و گاز، مدیریت هرچه بهتر آن‌ها بسیار مؤثر است [۲۳]. لاگ NMR به‌طور مستقیم تراوایی را حساب نمی‌کند، بلکه آن را به‌صورت تجربی توسط روابط مرتبط کننده تخلخل و تراوایی و بعضی از جنبه‌های پراکندگی اندازه منفذی به‌دست می‌آورد. در این پژوهش برای تعیین تراوایی به‌کمک NMR از فرمول Coates-Timur استفاده شده است.

$$KTIM = a*[FFI/BVI]^b*[\varphi_{NMR}]^C \quad (۲)$$

در این فرمول FFI نشان‌دهنده حجم سیال آزاد و BVI نشان‌دهنده حجم سیال نواری است. هرچه نسبت سیال آزاد به سیال نواری بزرگتر باشد، تراوایی نیز بیشتر است. در این فرمول c=۴، b=۲ و a=۱ می‌باشد. در نهایت داده‌های تخلخل و تراوایی حاصل از ابزار NMR به‌وسیله نرم‌افزار Techlog 2011.1 با نتایج مغزه همان چاه مورد مقایسه قرارگرفته است.

تعیین فشار موئینگی از طریق لاگ NMR

یکی از پارامترهایی که لاگ NMR قادر به پاسخگویی به آن می‌باشد، فشار موئینگی است اما زمانی که شکل حفرات دچار کج شدگی می‌شود و از حالت‌های متعارف به اشکال غیرمتعارف) کج و معوج (تبدیل می‌شوند معادل‌سازی فشار موئینه و روابط مربوط به زوال T_2 ممکن است با مشکل همراه باشد [۲۴]. رابطه بین حجم حفرات و اندازه شعاع گلوگاه تغییر کرده و پیچیده‌تر می‌شود. در نتیجه توانایی برای محاسبه خواصی که وابسته به ویژگی‌های شعاع گلوگاه هستند از طریق استفاده از خواص اندازه حفرات غیر قابل اتکاتر می‌شوند. با این حال شکل حفرات در این پژوهش از اشکال متعارف (کروی یا لوله‌ای) فرض شد که نسبت سطح به حجم براساس اندازه حفرات محاسبه گردید:

$$\frac{S}{V} = \frac{F_S}{r_b} \quad (۳)$$

F_s: فاکتور شکل، r_b: شعاع فضای خالی، s/v: نسبت سطح به حجم که برای حفرات کروی شکل به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{S}{V} = \frac{4*\pi*r^2}{\frac{4}{3}*\pi*r^3} = \frac{3}{r} \quad (۴)$$

مقدار فاکتور شکل (F_s) برای حفرات کروی ۳ و برای اشکال لوله‌ای (سیلندری) ۲ می‌باشد. هر دو رابطه (p_c و زوال T_2) دو حالت مختلف را تداعی می‌کنند و می‌توانند توسط متغیر اندازه شعاع گلوگاه (r_{pt}) به فشار موئینه و اندازه حجم حفرات مرتبط شوند (از طریق زوال T_2 و با فرض اینکه می‌توان اندازه حجم‌های قابل تطابق را به شعاع گلوگاه تبدیل کرد). اگر مقادیر r_{pt} در رابطه‌ی فشار موئینه را با مقادیر مربوط به T_2 حاصل از فرمول زوال T_2 جایگزین کنیم، فشار موئینه می‌توانند برحسب زوال T_2 برای زمان استراحت اسپین تعریف شود [۲۴].

$$\frac{1}{Pc}=\frac{\rho}{2\sigma\cos(\theta)}\frac{r_{pt}}{r_b}*Fs\ T_2 \quad (۵)$$

F_s: فاکتور شکل

P_c: فشار موئینگی (psi)

θ: زاویه تماس (°)

δ: کشش سطحی (dyne/cm)

r_{pt}: شعاع موئینگی (cm)

r_b: شعاع فضای خالی (cm)

با تغییراتی که در فرمول بالا داده شد، می‌توان مقدار C را طبق رابطه زیر تعریف کرد:

$$C=\frac{\rho}{2\sigma\cos(\theta)}\frac{r_{pt}}{r_b}*Fs \quad (۶)$$

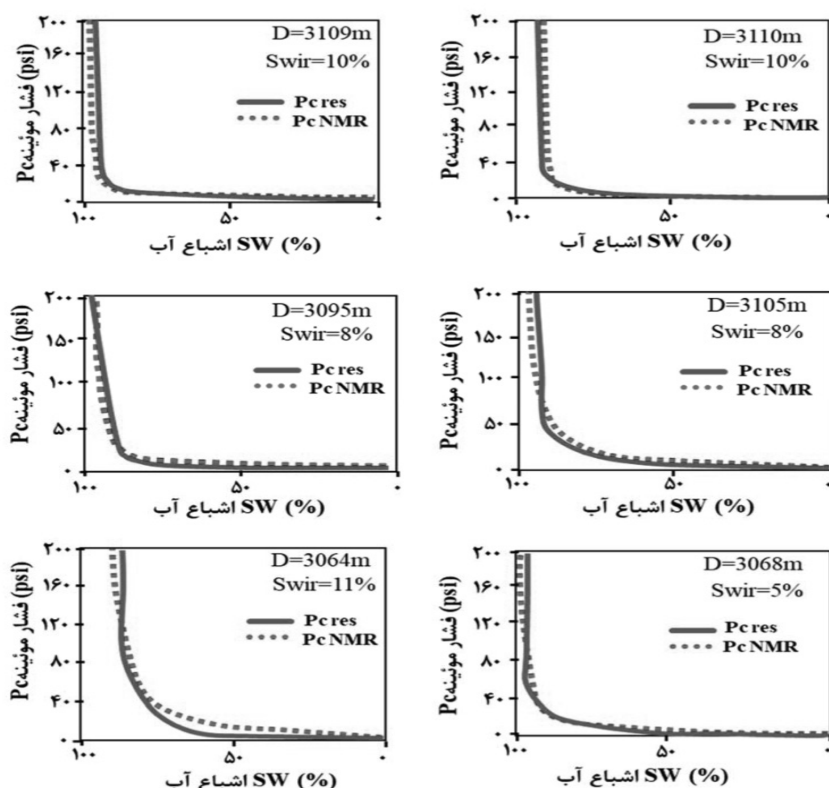
می‌توان فرمول اصلی را به‌صورت زیر ساده کرد:

$$\frac{1}{Pc}=C\ T_2 \quad (۷)$$

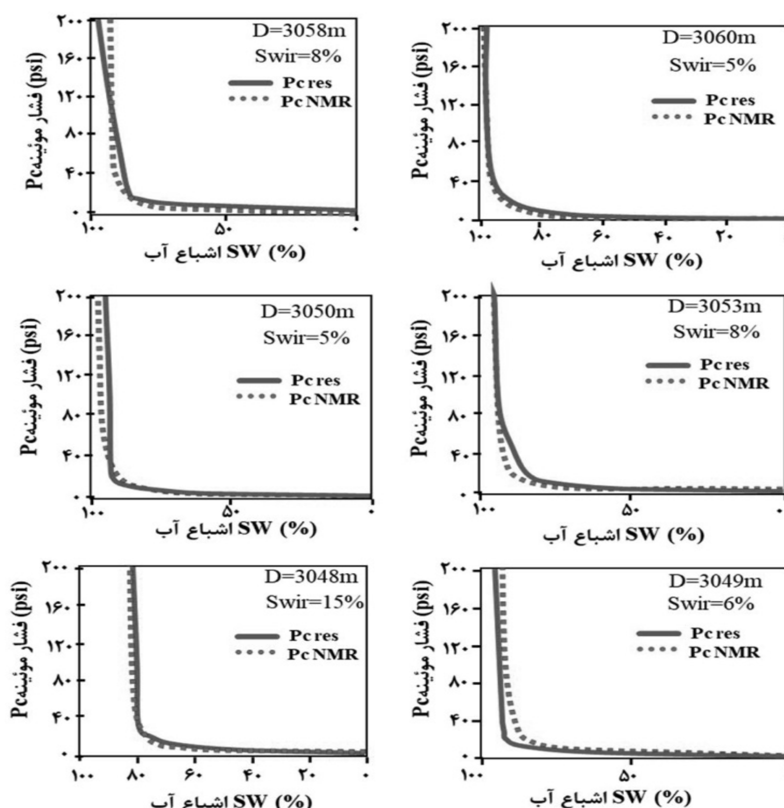
و یا اینکه رابطه را به‌صورت جبری زیر نوشت [۲۴]:

$$Log\ C=Log\ (1/Pc)-Log\ (T_2) \quad (۸)$$

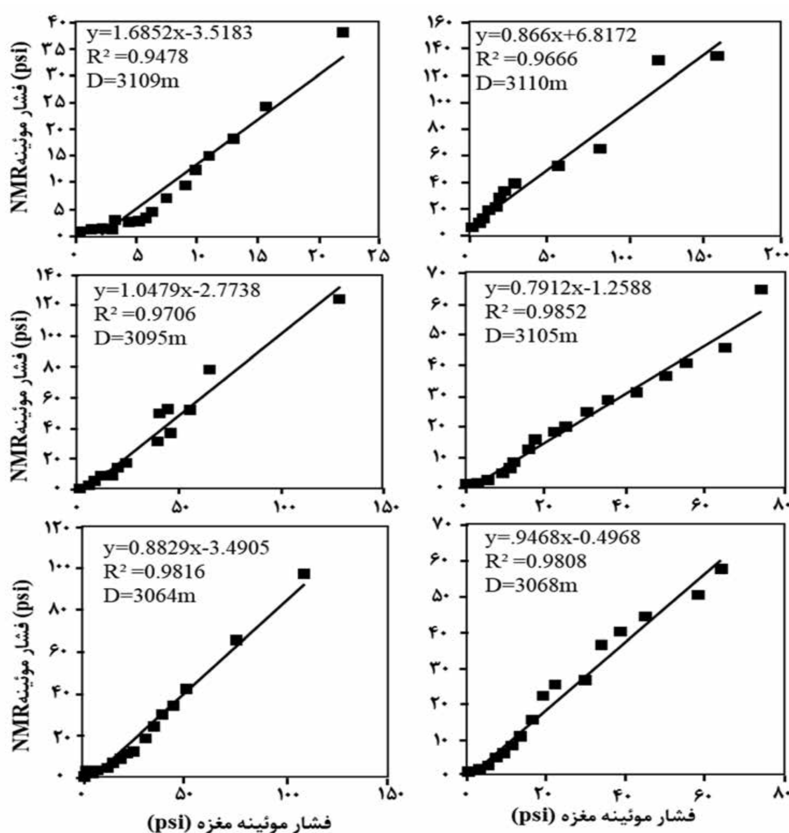
در این مطالعه به‌دلیل کمبود امکانات آزمایشگاهی نمی‌توان عدد ثابت C را به‌دست آورد. در این مطالعه برای رفع این مشکل، از نرم‌افزار تِک لاگ استفاده شده است. در نرم‌افزار تِک لاگ از رابطه ۸ استفاده شده است، که عدد ثابت C در این نرم‌افزار به‌صورت اتوماتیک ۱۰۰۰ تعریف شده است. اما عدد ثابت C برای هر میدان متغیر است و برای به‌دست آوردن عدد C، ابتدا یک چاه NMR فراخوانده می‌شود و بعد آنقدر عدد ثابت C تغییر داده می‌شود تا P_C که از لاگ NMR به‌دست می‌آید با P_C مغزه بیشترین تطابق را داشته باشد (شکل‌های ۲ الی ۵).



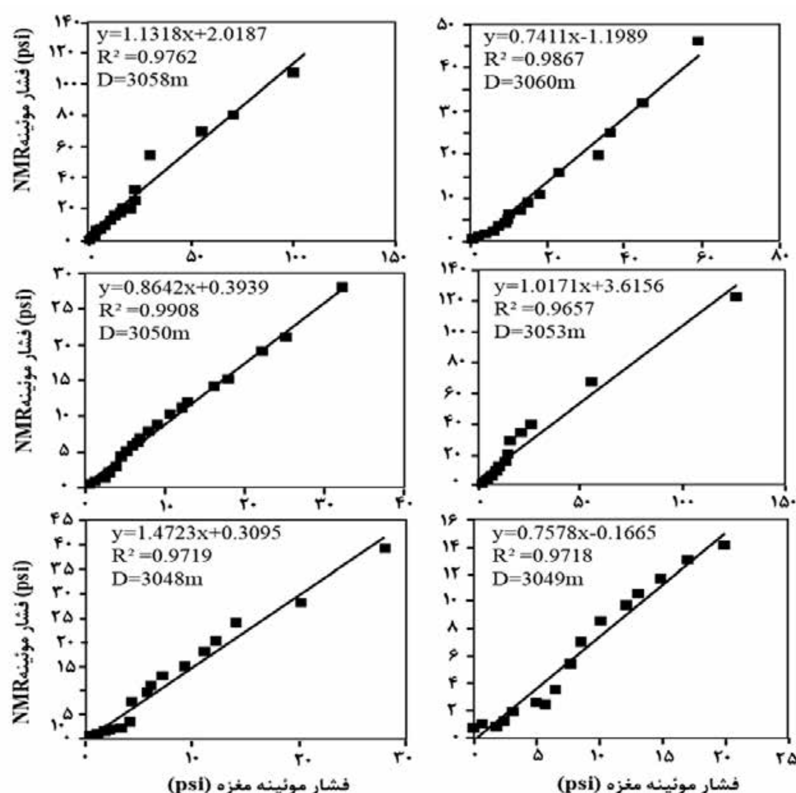
شکل ۲ مقایسه فشار موئینه مغزه ($P_{C\ RES}$) و فشار موئینه NMR وآب کاهش نیافتنی (Swir)



شکل ۳ مقایسه فشار موئینه مغزه (PC RES) و فشار موئینه NMR وآب کاهش نیافتنی (Swir)



شکل ۴ ضریب همبستگی بین فشار موئینه مغزه و فشار موئینه NMR در بخش K4 در اعماق انتخابی (D) سازند دالان



شکل ۵ ضریب همبستگی بین فشار موئینه مغزه و فشار موئینه NMR در بخش K4 در اعماق انتخابی (D) سازند دالان

این عدد ثابت C برای دو چاه (دوفاز جدا از هم) از میدان پارس‌جنوبی، ۲۳۰۰ به‌دست آورده شد.

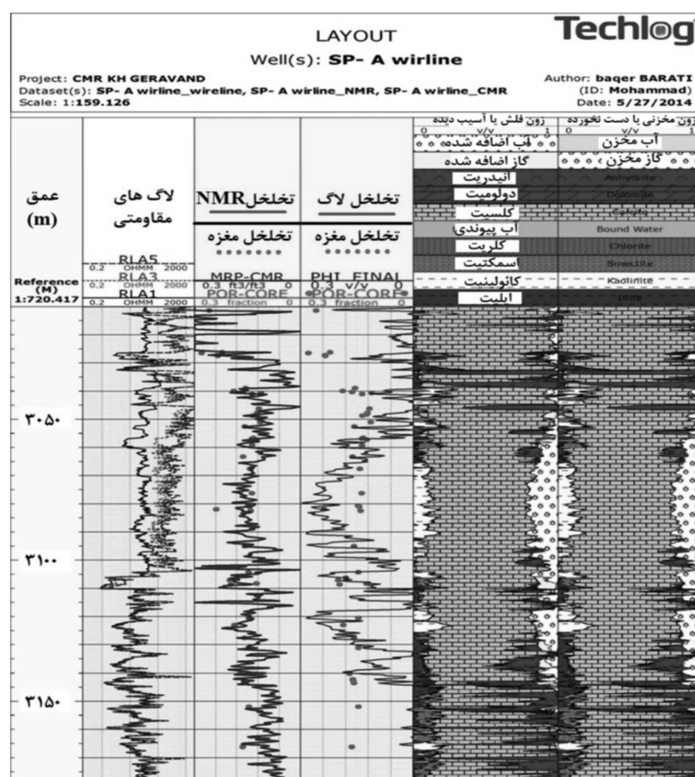
بحث و بررسی

مقایسه تخلخل مغزه و NMR

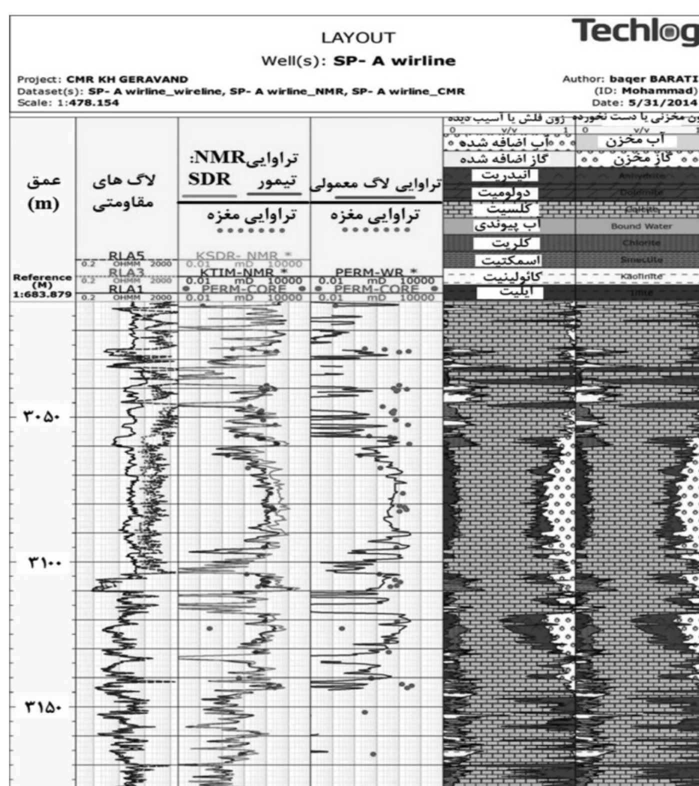
تخلخلی که از NMR به‌دست می‌آید مستقل از لیتولوژی است. لاگ نوترون تمامی هیدروژن‌ها را بدون توجه به مکان آن‌ها جزء تخلخل محسوب می‌کند [۲۵-۲۶]، ولی تخلخل NMR فقط هیدروژن‌های داخل سیالات را به‌حساب می‌آورد [۲۷]. لاگ NMR برخلاف لاگ‌های دیگر قادر است انواع بخش‌های مختلف که مجموعاً تخلخل کل سنگ را می‌سازند از هم تفکیک کند که این عمل کاربردهای بسیاری در صنعت نفت دارد [۲۸-۲۹]. در این مطالعه نمودار تخلخل NMR به‌دست آمده از بخش K4 سازند دالان با تخلخل حاصل از مغزه مورد مقایسه قرارگرفته است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد (شکل‌های ۶ و ۷).

مقایسه تراوایی NMR (Timur) با تراوایی مغزه

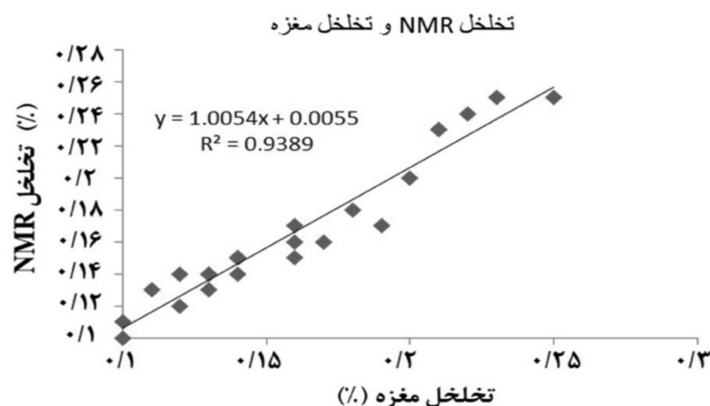
ضریب همبستگی تراوایی NMR (Timur) با تراوایی مغزه در بخش K4 برابر با ۰/۹۸ می‌باشد (شکل ۸). نتایج به‌دست آمده انطباق بسیار خوبی بین تراوایی NMR (Timur) و تراوایی مغزه وجود دارد (شکل ۹).



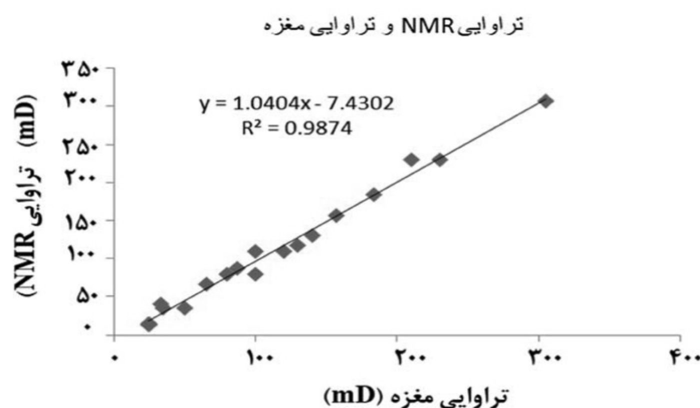
شکل ۶ لاگ‌های معمولی و NMR در چاه SP-A. ستون اول: نمودارهای مقاومت (RLA5 ,RLA3 ,RLA1)، ستون دوم: مقایسه تخلخل NMR با تخلخل مغزه، ستون سوم: مقایسه تخلخل لاگ‌های معمولی با تخلخل مغزه، ستون چهارم: لیتولوژی بخش K4 سازند دالان ترسیم شده است.



شکل ۷ لاگ‌های معمولی و NMR در چاه SP-A. ستون اول: نمودارهای مقاومت (RLA5 , RLA3 , RLA1). ستون دوم: مقایسه تراوایی (تیمور و NMR (SDR با تراوایی مغزه. ستون سوم: مقایسه تراوایی لاگ‌های معمولی با تراوایی مغزه. ستون چهارم: لیتولوژی بخش K4 سازند دالان



شکل ۸ ضریب همبستگی تخلخل NMR با تخلخل مغزه



شکل ۹ ضریب همبستگی تراوایی NMR با تراوایی مغزه

نتیجه‌گیری

نتایج زیر از مطالعات صورت گرفته در این تحقیق حاصل گردیده است: مقایسه تخلخل مغزه و تخلخل NMR تطابق خوبی را نشان می‌دهد و ضریب همبستگی بین تخلخل مغزه و تخلخل NMR برای بهترین زون مخزنی K4، ۰/۹۳ می‌باشد. با توجه به مقایسه تراوایی مغزه و تراوایی (تیمور) NMR تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد و ضریب همبستگی بین آن‌ها هم برای بهترین زون مخزنی K4، ۰/۹۸ می‌باشد (میانگین تراوایی (تیمور) NMR ۸۰ mD). بنابراین با توجه به خروجی به‌دست آمده از نمودار NMR و مقایسه آن با منحنی P_C حاصل شده از مغزه‌ها در زون K4 می‌توان گفت لاگ NMR از دقت بسیار خوبی جهت تخمین P_C برخوردار است. همچنین براساس ارزیابی‌های انجام شده برروی نمودارهای چاه‌پیمایی و تفسیر توسط نرم‌افزار جهت اندازه‌گیری میزان تخلخل، منطقه مورد مطالعه میانگین تخلخل بالایی را نشان می‌دهد (میانگین تخلخل کل ۱۵/۵۵٪ و میانگین تخلخل مؤثر ۱۱/۹٪). با توجه به حجم شیل پایین و تخلخل مناسب، ضخامت زون خالص این سازند بالا بوده و در نتیجه نسبت ضخامت خالص به ناخالص که یک پارامتر جهت نشان دادن استعداد مخزنی است بالا می‌باشد.

مراجع

[1]. Babadagli T, Al-salmi S (2004) A review of permeability Prediction methods for carbonate reservios using well-log data: SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 75-88.
[2]. Coates G R, Xiao I, Prammer MG (1999) NMR logging principles and Applications, Halliburton Energy Services Publication.
[3]. Kenyon B, Klennberge R, straley G, Gubelin G, Morriss C (1995) Nuclear magnetic resonance imaging technology for the 21-Century, Schlumberger Oilfield Review, 19-33.
[4]. Neuman C H, Brown R J S (1982) Application of nuclear magnetism logging ro formation evaluation, Journal of Petroleum Technology, 34: 2853-2862, .
[5]. Akuurt R, Vinegar H J, Tutunjian P N, Guillory A J (1995) NMR logging of natural gas reservoirs: 36th annual SPWLA logging symposium Transactions.
[6]. Epping W J, Eggenkamp L M, Reid I (1999) Added value form NMR measurement to characterize Gas Reserviors in the U.K Southern North Sea: SPE 5694, P.1-13, doi.org/10.2118/56944-MS .
[7]. Chehrazi A, Rezaee R (2012) A systematic method for permeability prediction, a Petro- Facies approach, Journal of Petroleum Science and Engineering, 82–83, 1–16, . http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.004.
[8]. Daigle H, Thomas B, Rowe H, Nieto M (2014) Nuclear magnetic resonance characterization of shallow marine sediments from the Nankai Trough, Integrated Ocean Drilling Program Expedition 333, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119, 4: 2631–2650, , doi: 10.1002/2013JB010784.
[9]. Hamada G M, Abushanab M A, Oraby M E l (2008) Petro physical properties evaluation of tight gas sand resevoirs using NMR and conventional borehole logs, SPE Asia Pacific oil and Gas Conference and Exhibition, SPE114254, doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.148.spe114254.
[10]. Heaerst J R, Nelson P H, Pailet F L (2000) Well logging for physical properties, John Wiley & Sons, Ltd, Chilchester.
[۱۱]. مردانـی ع، رضایـی م ر (۱۳۸۴) مقایسـه ماهیـت تخلخل‌هـای اندازه‌گیـری شـده توسـط CMR، لاگ‌هـای معمولـی و تخلخـل مغـزه، نهمیـن همایـش انجمـن زمین‌شناسـی ایـران، ۱۲، تهـران، https://civilica.com/doc/.31954
[۱۲]. زارعـی س، موحـد ب، باقـری ع م، مردانـی ع ر (۱۳۸۶) ارزیابـی تراوایـی سـازند کنـگان بـا اسـتفاده از داده‌هـای نـگار CMR و مغـزه در میـدان پارس‌جنوبـی، بیسـت و ششـمین گردهمایـی علوم‌زمیـن، ۱۴ اسـفند تهـران.
[۱۳]. زارعـی س، بابتنگلـی ع، موحـد ب (۱۳۸۷) ارزیابـی تراوایـی سـازند دالان بـا اسـتفاده از داده‌هـای نـگار CMR، رابطه‌هـای تجربـی و مغـزه در میـدان گازی پارس‌جنوبـی، اکتشـاف و تولیـد، ۵۵: ۳۹-۴۴. .
[14]. Labani M M, Kadkhodaie-Ilkhchi A, Salahshoor K (2010) Estimation of NMR log parameters from conventional well log data using a committee machine with intelligent systems: A case study from the Iranian part of the South Pars gas field, Persian Gulf Basin, Journal of Petroleum Science and Engineering, 72, 1–2: 175–185, doi: 10.1016/j.petrol.2010.03.015.
[15]. Kadkhodaie A, Rezaee R, Kadkhodaie R (2019) An effective approach to generate drainage representative capillary pressure and relative permeability curves in the framework of reservoir electrofacies, Journal of Petroleum Science and Engineering , 176: 1082–1094, doi: 10.1016/j.petrol.2019.01.098.
[16]. Dunn K, Bergman D, LaTorraca G (2002) Nuclear magnetic resonance, Petrophysical and Logging Applications, Elsevier.
[17]. Lai J, Wang G, Wang Z, Chen J, Pang X, Wang S, Zhou Z, He Z, Qin Z, Fan X (2018) A review on pore structure characterization in tight sandstones, Earth-Science Reviews, 177: 436−457, doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.003.
[18]. Freedman R (2006) Advances in NMR logging, Journal of Petroleum Technolgy, 58, 1: 60–66, doi: 10.2118/89177-JPT.
[19]. Wu H, Zhang C, Ji Y, Liu R, Wu H, Zhang Y, Geng Z, Zhang Y, Yang J (2018) An improved method of characterizing the pore structure in tight oil reservoirs: Integrated NMR and constant−rate− controlled porosimetry data, Journal of Petroleum Science and Engineering, , 166: 778−796, doi.org/10.1016/j.petrol.2018.03.065.
[20]. Zhang L, Lu S, Xiao D, Li B (2017) Pore structure characteristics of tight sandstones in the northern Songliao Basin, China, Marine and Petroleum Geology, 88: 170−180, doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.08.005.
[21]. Sfidari E, Kadkhodaie-Ilkhchi A, Najjari S (2012) Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems, Journal of Petroleum Science and Engineering, 86-87: 190-205, doi.org/10.1016/j.petrol.2012.03.024.
[22]. Gloriose J C, Aguirre o, Piotti G, Mengul J F (2003) Deriving capillary pressure and water Saturation from NMR transversal relaxation times, SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, doi.

org/10.2118/81057-MS.
[23]. Ogilvie S, Cuddy S, Lindsay C, Hurst A (2002) Novel methods of permeability prediction from NMR tool data, Dialog Magazine, 339, 1981: 1–14, [Online]. Available: http://www.lps.org.uk/docs/Dialog, Final draft3. pdf.
[24]. Altunbay M, Martain R, Robinson M (2001) Capillary pressure data from NMR logs and its implications on field economics, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3369–3378, doi: 10.2523/71703-ms.

[۲۵]. کاظم‌زاده ع، ولی ج، اصفهانی م ر، آلوکی بختیاری ح (۱۳۹۱) ترکیب داده های مغزه و چاه‌پیمایی به منظور پیش‌بینی سرعت امواج تراکمی در سنگ‌های مخازن کربناته، پژوهش نفت، ۲۲، ۷۱: ۵۷-۶۵، https:// sid.ir/paper/۱۱۵۱۸۶/fa.

[۲۶]. نورافکن ا، سلیمانی ب، کدخدایی ع (۱۳۹۴) ساخت نمودار سرعت موج برشی با بهره‌گیری از الگوریتم کلونی مورچه و استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی در میدان نفتی چشمه خوش، پژوهش نفت، ۲۵، ۱-۸۵: ۱۹۳-۲۰۳، https://sid.ir/paper/114994/fa.

[۲۷]. باسعادت م ر، کارگر ز، حسین‌زاده ج (۱۳۹۳) بررسی اشباع آب، ویسکوزیته و محاسبه میزان هیدروکربن موجود در سازند آسماری و ایلام به روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای (NMR)، پژوهش نفت، ۲۴، ۷۹: ۴۰-۵۱، https://sid.ir/paper/115011/fa.

[28]. Murphy D P (1995) NMR logging and core analysis - simplified, World Oil, 216, 4: 65–68, [Online]. Available: https://www.osti.gov/biblio/39931.
[29]. Shabani M, Ghaffary S, Yarmohammadi S (2021) Evaluation of rock properties determined from core and NMR data: a case study on asmari carbonate reservoir, Journal of Petroleum Science and Technology, 11, 3: 31, P.2-10, doi: 10.22078/JPST.2021.4540.1751.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۹۹-۸۴

مقایسه و طراحی سایز بهینه مش در مدل دینامیک سیالات محاسباتی تمیزکاری چاه

محمدباقر همایون*[۱]، محسن ده ودار[۱] و امیرحسین اشهر[۲]

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

چکیده

تقریباً بیست و پنج درصد زمان انتظار ناخواسته در دکل‌های حفاری ناشی از زمان‌های صرف‌شده برای تمیزکاری چاه است. با فراگیری سیستم‌های کامپیوتری قدرتمند فرآیندهای شبیه‌سازی عملیات تمیزکاری چاه و تهیه مدل از چاه‌های عملیاتی رو به گسترش بوده و این عمل ضمن افزایش دقت و بهره‌وری برای اجرا در میادین عملیاتی، از صرف زمان و هزینه‌های بسیاری جلوگیری می‌نماید. در پژوهش حاضر تلاش شده تا با استفاد از دینامیک سیالات محاسباتی مدلی بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام پذیرفته در حلقه جریان آزمایشگاه حفاری، طراحی و صحت‌سنجی گردد و با بررسی مدل حاضر با تعدادی مدل مشابه و نتایج آزمایشگاهی، بتوان مش بهینه و اثر آن بر افزایش دقت نتایج و همچنین بازدهی و سرعت شبیه‌سازی را مطالعه نمود. همچنین با مقایسه مدل تجربی جدید و مدل پیشین بهبودهای فیزیکی برای شبیه‌سازی محیط درون‌چاهی مانند افزودن نازل و سرمته و جایگیری خروجی جریان مشاهده و یک مدل CFD طراحی شده بر اساس مدل تجربی قدیمی نیز با این مدل CFD بهینه و طراحی شده برمبنای مدل تجربی جدید مقایسه شده و با بررسی دقت و زمان اجرای هر یک، مش بهینه انتخاب گردد.

کلمات کلیدی: حمل‌کننده حفاری، تمیزکاری چاه، مکانیک سیالات دوفازی، دینامیک سیالات محاسباتی، استقلال از مش

مقدمه

حمل کننده‌های حفاری به‌عنوان یکی از دغدغه‌های مهندسان نفت، سال‌ها است که به‌عنوان یکی از موضوعاتی که مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است مطرح می‌گردد. مطالعه‌ای که توسط شرکت آماکو صورت گرفته نشان می‌دهد که ۷۰٪ از زمان‌های انتظاری که به‌صورت ناخواسته رخ می‌دهند به‌دلیل گیر لوله‌ها است و یک سوم از این گیرها به‌دلیل مشکلات تمیزکاری چاه ایجاد می‌گردند [۱]. عدم تمیزکاری چاه مشکلات متعددی را ایجاد خواهد نمود. این مشکلات عبارت‌اند از ایجاد گشتاور اضافه، گیر مکانیکی، هرزروی سیال حفاری، مشکلات در سیمان‌کاری، چاه‌پیمایی و کنترل چاه [۴-۲]. در ابتدا و از اوایل دهه ۱۹۴۰ میلادی مطالعات تجربی در زمینه حمل کننده‌های حفاری آغاز شد [۵].

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی mb.homayoun@aut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4788.3148)

ازآنجایی‌که مطالعه پارامترهای اثرگذار بر حمله کننده‌ها در محل چاه امری خطرناک و هزینه‌بر بودند، مطالعات سرچاهی مباحث مرتبط با تمیزکاری چاه بسیار محدود بوده است. همین امر موجب شده است که دستگاه‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی حمله‌کننده‌های حفاری در سراسر دنیا ساخته و روزبه‌روز بر تعداد آن‌ها افزوده شود. حلقه‌های شبیه‌ساز حفاری بسته به شرایط متفاوت که در عملیات وجود دارد ساخته می‌شوند [۶]. با این اتفاق عملاً دستگاه‌های آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای تجربی در رأس امور قرار گرفتند. پارامترهای متعددی در این‌گونه دستگاه‌ها قابل کنترل می‌باشند مانند زاویه چاه [۶]، دبی سیال [۷]، جنس‌کننده‌ها [۸]، خواص سیال حفاری [۹]، نرخ نفوذ حفاری [۱۰]، سرعت چرخش رشته حفاری [۱۱] و حتی بررسی اثر زمان در این فرآیند [۱۵-۱۲]. مطالعات اولیه در این زمینه در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ میلادی در مورد انتقال کننده‌ها در رابطه با حفاری انحرافی به‌صورت تجربی در طبیعت به وجود آمده است که این به‌دلیل عدم فهم رفتار حرکت کننده‌ها در قسمت‌های مختلف به ویژه انحرافی چاه بود. در اواخر دهه ۸۰ و زمانی‌که الگوی حرکت کاملاً فهمیده شد و فاکتورهای مؤثر بر تمیزکاری چاه به‌طور کامل بررسی شد توسعه مدل‌های مکانیکی هم شروع گردید [۱۶]. فاکتورهای مؤثر بر تمیزکاری در دسته‌بندی‌های رئولوژی گل، دبی سیال در فضای دالیزی، اندازه ذرات کنده، چگالی گل، گران‌روی گل و نرخ نفوذ حفاری بررسی شده‌اند. هر یک از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی پارامترهای اثرگذار بر تمیزکاری چاه و انتقال کننده‌های حفاری را می‌توان از حیث پارامترهای مربوط به ذرات سنگ، پارامترهای مربوط به سیال و پارامترهای مربوط به فیزیک چاه دسته‌بندی نمود. حسین و همکاران، پیگوت و بلاوادی و چوک وو معتقدند گرانروی کم سیال باعث تمیزکاری بهتر می‌شود [۲۲ تا ۲۴] درحالی‌که سیفرمن و همکاران گرانروی زیاد را باعث تمیزکاری بهتر دانسته [۲۱] و زیدلر معتقد است گرانروی تأثیری بر تمیزکاری ندارد [۲۰]. سیفرمن و همکاران و پیگوت بر خلاف حسین و همکاران و مم و اسکاله جریان آرام را باعث تمیزکاری بهتر فضای دالیزی می‌دانند [۲۱، ۲۳، ۲۴، ۳۱]. بیلگسو و همکاران، دهودار و همکاران، مارتین و همکاران و حاجی پور معتقدند دبی بالا تمیزکاری بهتر و جدایش ذرات کنده بهتری را به همراه دارد، بلاوادی و چوک وو چرخش رشته حفاری را نیز به این مورد اضافه می‌کنند و سیفرمن و همکاران این افزایش بازده تمیزکاری را افزایشی فزاینده که پس از مدتی به ثبات می‌رسد توصیف کردند [۲۲-۱۹، ۲۵، ۲۸، ۳۰]. بلاوادی و چوک وو، واکر و لی، مم و اسکاله، بیلگسو و همکاران و حاجی‌پور کنده کوچک را باعث تمیزکاری بهتر می‌دانند اما سیفرمن و همکاران اندازه ذرات را دارای اثری متوسط بر تمیزکاری عنوان کرده‌اند [۲۲ و ۲۳، ۳۱-۲۸]. در آخر نیز سیبرگ و همکاران، آذر و اوکرانجی و مم و اسکاله بر خلاف حاجی‌پور گرانروی پایین را موجب تمیزکاری بهتر چاه دانستند [۲۶ و ۲۷، ۳۳-۳۰]. از میان افرادی که به آنالیز CFD تمیزکاری چاه و پارامترهای مرتبط پرداخته اند، علاوه‌بر نتایج مم و اسکاله، آخشیک و همکاران با بررسی برهم‌کنش سیال-جامد در مدلی با کوپل دینامیک سیالات محاسباتی و روش المان مجزا، با شبیه‌سازی سرعت‌های مختلف ورود سیال و زوایای لوله حفاری، رابطه مستقیم سرعت تمیزکاری با زاویه چاه را نتیجه گرفت [۳۰]. بیرن و همکاران نیز با ارائه تاریخچه مواردی که برتری کاربرد مدل‌سازی دقیق و ابتکاری آسیب سازند را بر سیالات و روش‌های مختلف حفاری و تکمیل نشان می‌دهد، به این نتیجه رسیدند که علاوه‌بر مزایای شبیه‌سازی، دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده با CFD نیز هم ارز با آزمایش‌های واقعی است [۲۹] و دهودار و همکاران با بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تمیزکاری، محدوده زاویه °۳۰ تا °۵۵

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۹۹-۸۴

را محدوده بحرانی برای تمیزکاری معرفی کردند [۲۳]. در پژوهش حاضر تلاش شده است با بهبود دستگاه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مناسب‌تر شرایط درون چاهی، تغییراتی که در حلقه جریانی آزمایشگاهی به‌وجود آمده در مدل دینامیک سیالات محاسباتی جدیدی به‌روز شود. این تغییرات شامل اضافه شدن سرمته حفاری به‌همراه چهار نازل به جای چهار روزنه خروجی سیال در مدل قبلی و همچنین، تغییر در جانمایی خروجی جریان سیال به‌دلیل شبیه‌سازی بهتر فضای دالیزی است. با مش‌زنی برروی مدل شبیه‌سازی در سایزهای گوناگون، نتایج حاصل را با مدل‌های پیشین برای مسئله مشابه بررسی نموده تا اثر طراحی و اجرای مش و سایز بهینه آن بر سرعت و نتایج شبیه‌سازی مشخص شود؛ همچنین برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده برای هر یک نیز ارائه و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

شیوه‌شناسی و روش کار

از آن‌جا که مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی در حوزه حمل‌کننده‌های حفاری در مقایسه با مطالعاتی که مهندسان شیمی به روی محیط‌های مشابه با فضای دالیزی انجام داده‌اند کم است، سعی شده است تمام محیط‌هایی که در این رشته شبیه به فضای دالیزی بوده‌اند نیز مورد مطالعه قرار گیرند. از جمله مهم‌ترین این محیط‌ها که با نام کلی بسترهای سیال مطرح است در مطالعات زیادی مورد توجه قرار گرفته است [۴]. بسترهای سیال مورد استفاده در دستگاه‌های فوق اکثراً برای محیط‌های حاوی گاز-جامد هستند و مطالعات جامد-مایع سهم کمی را در بین آن‌ها دارند؛ در بعضی هم چندین جامد در یک فاز پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۳، ۴، ۷]. با مشاهده نتایج آزمایشگاهی و مطالعات گذشته نتیجه می‌شود که در فضای لوپ‌های حفاری، حرکت جامد-مایع در حالت عمودی به‌صورت مخلوط و در بقیه موارد به نگاه اویلری-اویلری بسیار نزدیک است. مدل مخلوط برای دو فاز یا بیشتر طراحی شده است. فازها به‌عنوان یک محیط پیوستهٔ در هم نفوذکننده در نظر گرفته شده و روابط مومنتوم برای مخلوط حل و از سرعت‌های نسبی جهت تشریح فازهای پراکنده استفاده می‌شود. جهت مدل کردن جریان‌های چندفازی یکنواخت، می‌توان سرعت نسبی فازهای پراکنده را در نظر نگرفت. در این مدل گرانروی مخلوط را باید مورد توجه قرار داد [۱۷].

$$\frac{1}{\rho_{rq}}\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \alpha_q\right)\right)+\nabla.\left(\alpha_q \alpha_q \overrightarrow{V_q}\right)=\sum_{p=1}^{n}\left(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp}\right) \quad (۱)$$

در رابطه بالا که از روابط پیوستگی است، نشان داده می‌شود که جرم سیستم در طول زمان ثابت می‌ماند. همچنین دقت شود که رابطه بالا، روی حجم سیستم اعمال می‌شود. حل این رابطه برای هر یک از فازهای ثانویه همراه با این شرایط است که مجموع کسرهای حجمی برابر یک باشد. برای شبیه‌سازی حرکت ذرات جامد توسط سیال (گاز یا مایع) رابطه مومنتوم تغییرات اندکی می‌کند. تنش‌های فاز جامد با ایجاد تشابه میان حرکت تصادفی ذرات ناشی از برخوردهای ذره- ذره و حرکت حرارتی مولکول‌ها در یک گاز و در نظر گرفتن غیرالاستیک بودن فاز دانه‌ای به‌دست می‌آیند. همانند یک گاز، شدت نوسانات سرعت ذره تعیین‌کننده تنش، گرانروی و فشار جامد است. انرژی جنبشی همراه با نوسانات سرعت ذره با یک ترم شبه دمایی یا دمای دانه‌ای، نشان داده می‌شود که متناسب با مربع متوسط حرکت تصادفی ذرات است. رابطه مومنتوم سیال جامد برای فاز sام به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_s \rho_s \overrightarrow{V_s}\right)+\nabla.\left(\alpha_s \rho_s \overrightarrow{V_s}\overrightarrow{V_s}\right)=$$
$$-\alpha_s \nabla p-\nabla p_s+\nabla.\overline{\overline{\tau_s}}+\alpha_s \rho_s \vec{g}+\sum_{L=1}^{n}\left[K_{ls}\left(\overrightarrow{V_l}-\overrightarrow{V_s}\right)+\dot{m}_{ls}\overrightarrow{V_{ls}}-\dot{m}_{sl}\overrightarrow{V_{sl}}\right]$$
$$+\left(\overrightarrow{F_s}+\overrightarrow{F_{lift,s}}+\overrightarrow{F_{vm,s}}\right) \quad (۲)$$

ارتباط این روابط پیوستگی و مومنتوم، از طریق فشار و ضرایب تبادل بین فازی صورت می‌گیرد. این ارتباط به نوع فازها بستگی دارد. ازآنجاکه

جریان‌های مایع- جامد را می‌توان جریان دانه‌ای نامید. برای جریان‌های دانه‌ای، خواص با به‌کارگیری تئوری سینتیک به‌دست می‌آیند [۱۸، ۳۱، ۳۳]. رابطه انتقالی که با استفاده از سینتیک گازها به‌دست می‌آید عبارت خواهد بود از:

$$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_s \alpha_s \theta_s\right)+\nabla.\left(\rho_s \alpha_s \overline{V_s} \theta_s\right)\right]$$
$$=\left(-p_s \overline{\overline{I}}+\overline{\overline{\tau_s}}\right):\nabla\overrightarrow{W_s}+\nabla.\left(K_{\theta_s}\nabla\theta_s\right)-\gamma_{\theta_s}+\varphi_{ls} \qquad (۳)$$

برای کنده‌های موجود در حلقه جریان نیز رابطه ۴ حاکم است [۲۳].

$$v_x=\left[\frac{4[3\tau_y(\phi+(\frac{\pi}{2}-\phi)\sin^2\phi-\cos\phi\sin\phi)\tan\phi+d_p(\rho_p-\rho)\cdot(\cos\alpha+\sin\alpha\tan\phi)]}{3\rho(C_{Drag}+C_{Lift}\tan\phi)}\right]^{0.5} \qquad (۴)$$

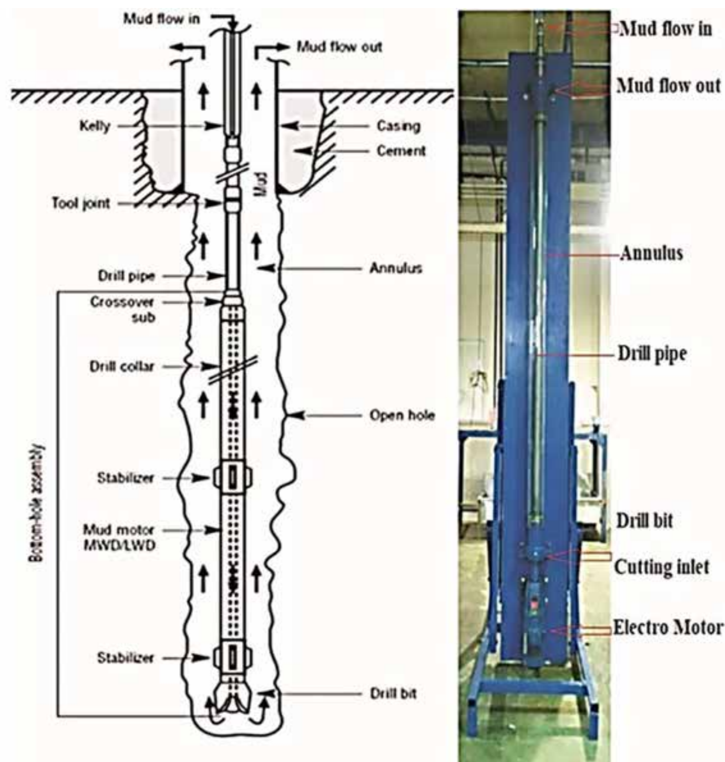
که به‌وضوح تابع چگالی کنده، قطر ذرات و هندسه و جهت‌گیری چاه بوده و پارامترهای نیروهای برآ و پسا نیز به آن وارد شده است. به طریق مشابه برای محاسبه سرعت لازم برای غلتش و دوران کنده‌ها نیز رابطه ۵ وجود دارد [۲۳].

$$v_x=\left[\frac{4[3\tau_y(\phi+(\frac{\pi}{2}-\phi)\sin^2\phi-\cos\phi\sin\phi)+d_p(\rho_p-\rho)}{3\rho(C_{Drag}-C_{Lift}\tan\phi)}\right]^{0.5}$$

(۵)

مدل تجربی

یک حلقه جریان در آزمایشگاه حفاری وظیفه شبیه‌سازی محیط درون چاهی داخل مناطق عملیاتی را به‌عهده دارد. مطالعه حاضر، از طریق مدل‌سازی حلقه جریان با نام AUT-PET 01 با ابعاد طول کل ۲۲۰ cm، قطر لوله بیرونی (چاه) ۹ cm، قطر مته ۶/۳ cm و قطر لوله درونی (رشته حفاری) ۴/۳ cm انجام شده که مدل بهبود یافته دستگاه مورد مطالعه در پژوهش ده‌دار و همکاران می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. در شکل ۱ می‌توان حلقه جریان را در حالت قائم در کنار نمای فنی آن مشاهده کرد. آزمایش انتخاب شده برای مدل‌سازی از سیال آب با دبی جریانی ۲۲/۸۴ gpm برای مجموع نازل‌های چهارگانه به‌عنوان ورودی بهره می‌برد. این دبی جریانی با توجه به قطر ۸ mm دهانه هر یک از نازل‌ها، برابر با سرعتی در حد ۷/۱۵۶۶ m/s برای سیال خروجی از هر نازل می‌باشد.



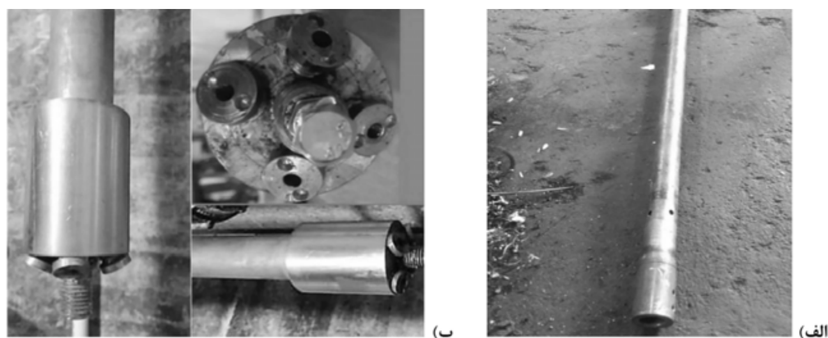
شکل ۱ نمای فنی و بیرونی حلقه جریان (AUT-PET 01) [۱۸، ۱۹].

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۹۹-۸۴

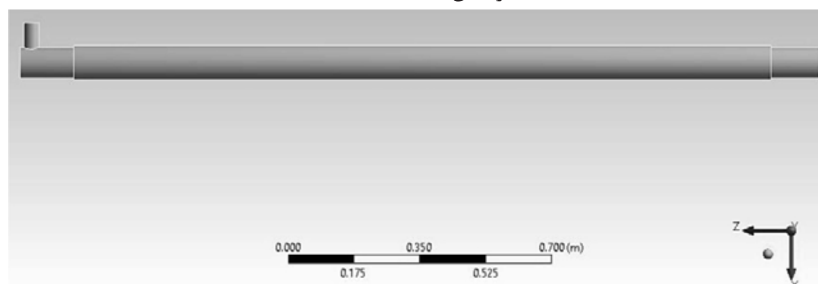
در شکل ۲ نازل‌های به‌کارگیری‌شده در حلقه جریان در قیاس با نمونه قدیمی آن (بدون در نظر گرفتن نازل) قابل مشاهده است. علاوه‌بر این مقدار کنده‌ای که در انتهای حلقه جریان به‌عنوان کنده‌های ته‌چاهی در نظر گرفته شد، مقدار g ۵۰۰ از جنس سنگ کربناته ($CaCO_3$) بوده است. ذرات کربناته چگالی حدود kg/m³ ۳۲۸۰۰ داشته و میانگین قطر ذرات برابر با mm ۱ در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی کامپیوتری دستگاه حلقه جریان و مش‌زنی

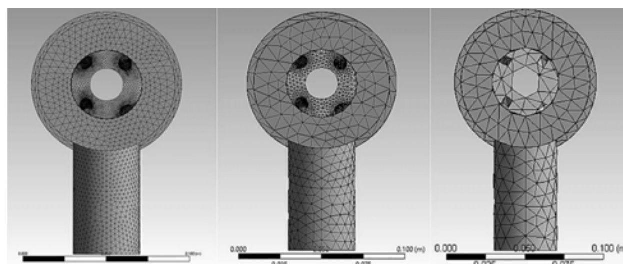
در اولین قدم در نرم‌افزار ANSYS Workbench 19.1 و برروی سیستمی با پردازنده Intel Core i7 2794 HQ و مقدار GB ۱۲ حافظه رم، محیط شبیه‌سازی با ابعاد واقعی طراحی و مش‌زنی آن صورت گرفته است (شکل ۳ و ۴).



شکل ۲ الف) نمای روزنه‌های خروجی سیال در مدل پیشین و ب) نمای نازل‌های سر مته از زوایای مختلف در حلقه جریان AUT-PET 01



شکل ۳ مدل طراحی شده از حلقه جریان در نرم‌افزار Design modeler



شکل ۴ نمای مش‌زنی از سطح مقطع X-Y برای مش نوع A (سمت راست)، نوع B (وسط) و نوع C (سمت چپ)

در جدول ۱ انواع مش تولید شده برای مدل و مشخصات هر یک توضیح داده شده است. استقلال از مش به بیان ساده عبارت از بررسی تعداد مش دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این مش است. به بیان دیگر باید برای دامنه حل با تعداد مش‌های مختلف حل عددی صورت گیرد و نشان داده شود که این حل برای تمام مش‌ها جوابی یکسان و نزدیک دارد و حل مورد نظر به تعداد مش وابستگی ندارد. این فرآیند با در نظر گرفتن سه نوع مش A، B و C در این پژوهش صورت گرفته است و توضیحات بیشتر در بخش نتایج ذکر گردیده است.

جدول ۱ مشخصات انواع مش اعمال‌شده بر مدل

فاکتور	مش نوع A	مش نوع B	مش نوع C
نوع مش	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی
تعداد المان‌ها	۱۰۸/۷۰۲	۱۹۶/۹۰۰	۵۰۱/۸۶۷
سایز المان‌ها	۵	۰/۱۰۶۷	۰/۱۰۶۷
نسبت ابعاد[1] (میانگین)	۱/۸۶۷۶	۱/۸۷۸۳	۱/۸۸۴۶
چولگی[2] (حداکثر)	۰/۸۴۹۹	۰/۸۴۳۹	۰/۹۸۰۷
کیفیت متعامد[3] (حداقل)	۰/۱۵۰۱	۰/۱۵۶۱	۰/۱۹۲۸
کیفیت المان‌ها (میانگین)	۰/۸۳۶۱	۰/۸۲۹۳	۰/۸۲۴۰
لایه مرزی	خیر	خیر	خیر

شبیه‌سازی مدل کامپیوتری با CFD

پس از اتمام فرآیند طراحی و مش‌زنی مدل فیزیکی، فرآیند ورود مشخصات فازهای سیال طبق جدول ۲ و تعیین نقش دیواره‌ها و روش حل محاسبات انجام می‌پذیرد.

جدول ۲ مشخصات فازهای سیال

خواص	آب	کلسیم کربنات
چگالی (kg/m^3)	۹۹۸/۲	۲۸۰۰
گرانروی (kg.m/s)	۰/۰۰۱۰۰۳	-
قطر ذرات (mm)	-	۱

نتایج و تحلیل آن‌ها

نتایج آزمایش تجربی جدید

مدل تجربی با ابعادی که پیش‌تر ذکر شد، قابلیت اجرای آزمایش‌های دوفازی و سه فازی را دارد. ورودی دستگاه شبیه‌ساز از دو بخش تشکیل شده‌است که یک بخش آن وظیفه تزریق کنده به درون دستگاه را بر عهده دارد؛ این امر به‌وسیله یک مکنده که در زیر دستگاه قرار داده شده است صورت می‌گیرد. این دستگاه قابلیت تزریق کنده در دبی‌های مختلف را دارد. این آزمایش بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا مخزن L ۳۰۰ از آب پر شده و سپس مجموعه دستگاه برای بستن نازل‌ها باز می‌شود. در مرحله بعد g ۵۰۰ کنده در مخزن کنده‌ها ریخته شده و پمپ‌مکنده جهت تزریق کنده‌ها به فضای دالیز روشن می‌گردد. پس از پایدارشدن کنده‌ها در فضای دالیز، دوربین و ابزار ثبت داده‌ها فعال و مستقر می‌گردد. در این زمان نیز با روشن کردن موتور گرداننده رشته حفاری و روشن کردن پمپ گریز از مرکز جهت پمپ کردن آب، کنده‌ها در خروجی با توجه به بازه‌های زمانی مورد نظر جمع‌آوری شده و با خشک کردن کنده‌ها و وزن کردن آن‌ها میزان‌کنده‌های خارج شده گزارش می‌شود. با توجه به مشخصات سیال حفاری آب و ذرات سنگ کربناته $CaCO_3$، زمان اندازه‌گیری شده برای هر مرحله خروج کنده‌ها از حلقه جریان در جدول ۳ و شکل ۵ آمده است.

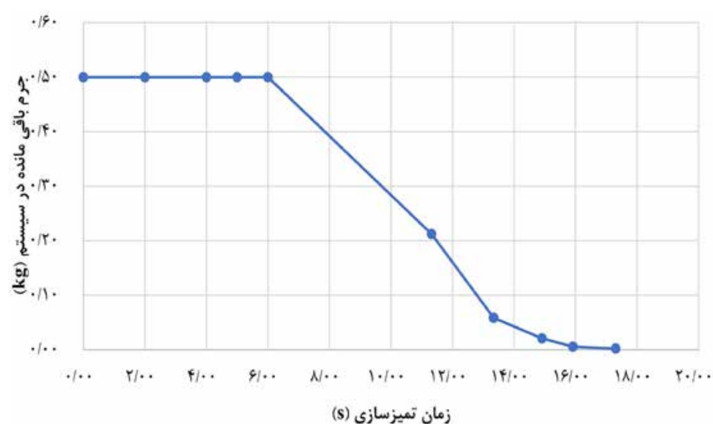
نتایج شبیه‌سازی CFD

پس از انجام شبیه‌سازی برای هر یک از مش‌های نوع A و B و C نیز نمودارهایی مشابه بخش تجربی به‌دست آمد که نشان‌دهنده تغییرات جرم کنده‌های $CaCO_3$ با زمان در سیستم می‌باشد. برای شروع نتایج جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در حلقه جریان بر حسب زمان برای مش نوع A در جدول ۴ آمده است. شمای گرافیکی مراحل تخلیه کنده‌های حفاری از حلقه جریان در مدل A را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.

1. Aspect Ratio
2. Skewness
3. Orthogonal Quality

جدول ۳ جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان در مدل تجربی

جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده (kg)	زمان (s)
۰/۵۰۰۰۰	۰
۰/۵۰۰۰۰	۲
۰/۵۰۰۰۰	۴
۰/۵۰۰۰۰	۵
۰/۵۰۰۰۰	۶
۰/۲۱۲۲۸	۱۱/۳۲
۰/۰۵۸۵۶	۱۳/۳۴
۰/۰۲۰۸۴	۱۴/۹۱
۰/۰۰۵۵۳	۱۵/۹۲
۰/۰۰۲۲۱	۱۷/۳۱
۰/۰۰۰۹۸	۱۸/۶۹

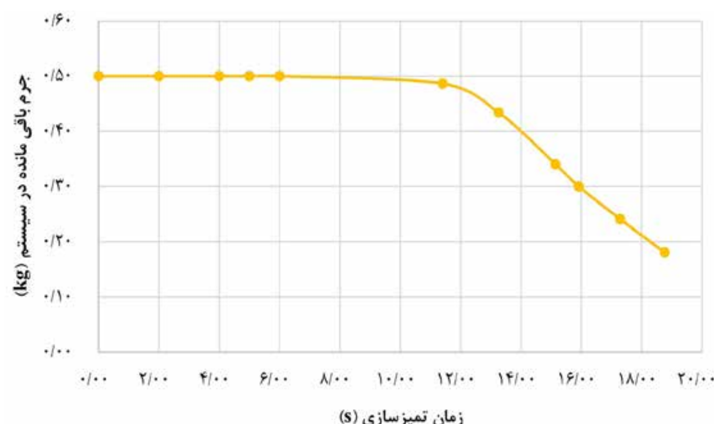


شکل ۵ نمودار تغییرات جرم $CaCO_3$ موجود در سیستم برحسب زمان در آزمایش تجربی

جدول ۴ جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع A

جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده (kg)	زمان (s)
۰/۵۰۰۰۰	۰
۰/۵۰۰۰۰	۲
۰/۵۰۰۰۰	۴
۰/۵۰۰۰۰	۵
۰/۵۰۰۰۰	۶
۰/۴۸۶۴۹	۱۱/۴۱
۰/۴۳۴۰۲	۱۳/۲۶
۰/۳۳۹۹۱	۱۵/۱۵
۰/۲۹۹۴۸	۱۵/۹۲
۰/۲۴۰۶۸	۱۷/۲۹
۰/۱۸۱۱۵	۱۸/۷۷

* با توجه به در دسترس نبودن مقادیر زمان‌های دقیق و منطبق بر آزمایش تجربی در این مش، نزدیک‌ترین زمان‌ها به‌عنوان مرجع انتخاب شده‌اند.



شکل ۶ نمودار تغییرات جرم $CaCO_3$ موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع A

در مرحله بعدی شبیه‌سازی مذکور بدون تغییر برای مدل B با تعداد مش‌های بیشتر (حدود ۲۰۰/۰۰۰ مش) صورت پذیرفت که مقدار جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در هر زمان در جدول ۵ و نمای گرافیکی مراحل خروج کنده‌ها در شکل ۷ آمده است.

جدول ۵ جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع B

جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده (kg)	زمان (s)
۰/۵۰۰۰۰	۰
۰/۵۰۰۰۰	۲
۰/۵۰۰۰۰	۴
۰/۵۰۰۰۰	۵
۰/۵۰۰۰۰	۶
۰/۲۴۱۰۸	۱۱/۳۲
۰/۰۶۴۰۷	۱۳/۳۴
۰/۰۱۹۷۷	۱۴/۹۱
۰/۰۰۵۰۷	۱۵/۹۲
۰/۰۰۰۱۶	۱۷/۳۱
۰/۰۰۰۰۱	۱۸/۶۹

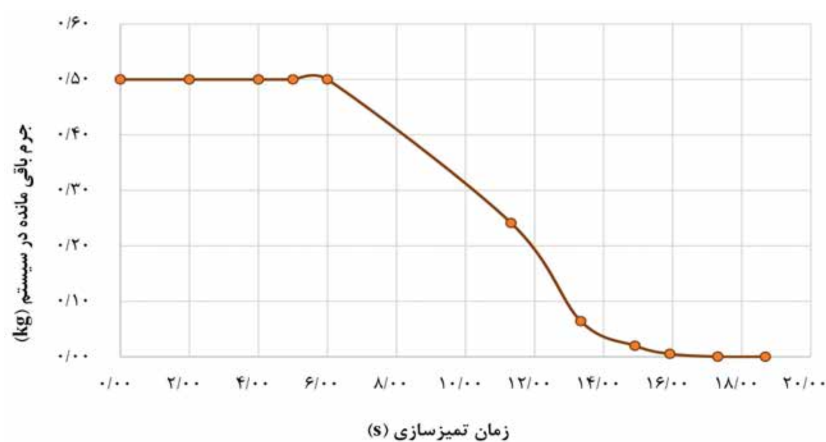
در آخرین شبیه‌سازی در این بخش نیز برای مدل C با حدود ۵۰۰/۰۰۰ مش شبیه‌سازی خروج کنده‌های $CaCO_3$ انجام گردید که داده‌های جرم بر حسب مقدار در جدول ۶ و نمودار شکل ۸ قابل مشاهده است.

صحت‌سنجی مدل‌سازی با داده‌های تجربی

برای مقایسه مش نوع B با مدل تجربی مقدار تفاضل مقادیر مدل CFD و مدل تجربی نیز به‌عنوان خطای محاسبه در هر نقطه تهیه گردیده که در جدول ۷ آمده است.

مقایسه نتایج و ارائه تحلیل

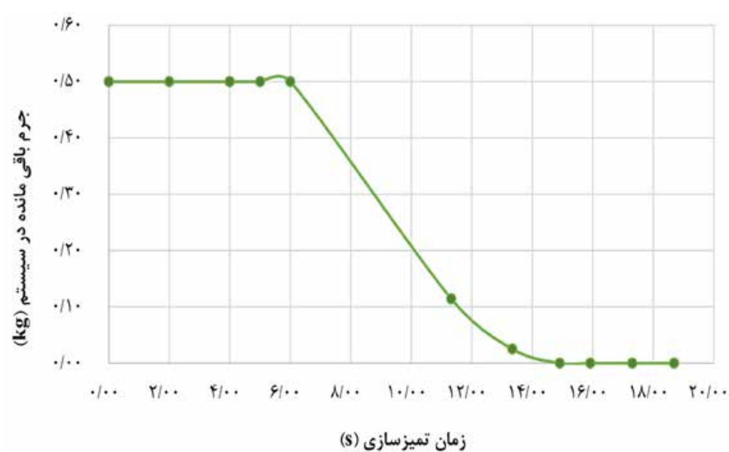
در جدول ۸ نتایج مدل B و C با یکدیگر مقایسه و تفاوت مقادیر آن‌ها نسبت به یکدیگر گزارش شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر به غیر از یک نقطه که در تمام زمان‌ها بالاترین تفاوت را دارند (۱۱/۳۲ s) در سایر نقاط با تفاوتی کمتر از ۰/۰۴ نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و به‌خوبی به هدف پژوهش در بخش بررسی استقلال مش از ۲۰۰ هزار به ۵۰۰ هزار دست یافته‌ایم. نمودارهای همه موارد نیز در یک نمودار تجمعی در شکل ۹ آمده است. همان‌طور که گفته شد و در شکل ۹ قابل مقایسه است، در مش نوع A با توجه به عدم دقت کافی مدل، در زمانی که مدل تجربی و مش نوع B و C تقریباً تمام $CaCO_3$ موجود در سیستم را خارج کرده‌اند حدود ۳۶٪ (۱۸۱ g) از ذرات کنده همچنان در سیستم باقی است. در این نمودار نیز داده‌های عددی به‌صورت گرافیکی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و به غیر از خطای اندازه‌گیری در بخش مدل تجربی که تعداد نقاط کمی ارائه داده شده، مدل CFD به‌خوبی نتایج همسویی با نتایج آزمایشگاهی ارائه داده است.



شکل ۷ نمودار تغییرات جرم $CaCO_3$ موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع B

جدول ۶ جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع C

زمان (s)	جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده (kg)
۰	۰/۵۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۱۱۴۳۴
۱۳/۳۴	۰/۰۲۵۱۲
۱۴/۹۱	۰/۰۰۰۱۳
۱۵/۹۲	۰/۰۰۰۰۱
۱۷/۳۱	۰/۰۰۰۰۰
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۰۰



شکل ۸ نمودار تغییرات جرم $CaCO_3$ موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع C

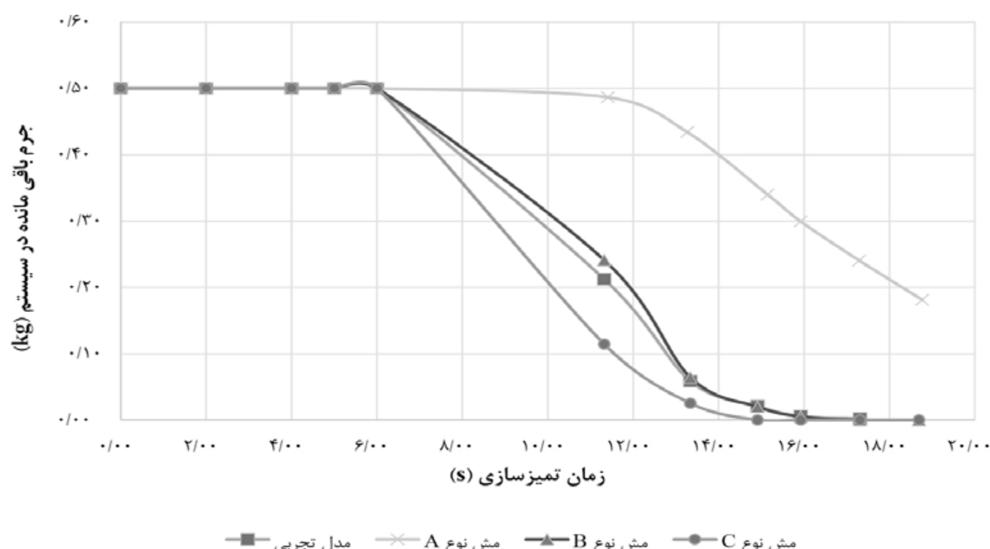
جدول ۷ مقایسه مقادیر $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم در مدل تجربی و مدل CFD نوع B و تفاضل آن‌ها

زمان (s)	جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل تجربی (kg)	جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل CFD نوع B (kg)	تفاضل مدل CFD از مدل تجربی
۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۲۱۲۲۸	۰/۲۴۱۰۸	۰/۰۲۸۸۱
۱۳/۳۴	۰/۰۵۸۵۶	۰/۰۶۴۰۷	۰/۰۰۵۵۱
۱۴/۹۱	۰/۰۲۰۸۴	۰/۰۱۹۷۷	-۰/۰۰۱۰۷
۱۵/۹۲	۰/۰۰۵۵۳	۰/۰۰۵۰۷	-۰/۰۰۰۴۶
۱۷/۳۱	۰/۰۰۲۲۱	۰/۰۰۰۱۶	-۰/۰۰۲۰۵
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲

جدول ۸ مقایسه مقادیر $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم در مدل‌های CFD نوع B و C تفاضل آن‌ها

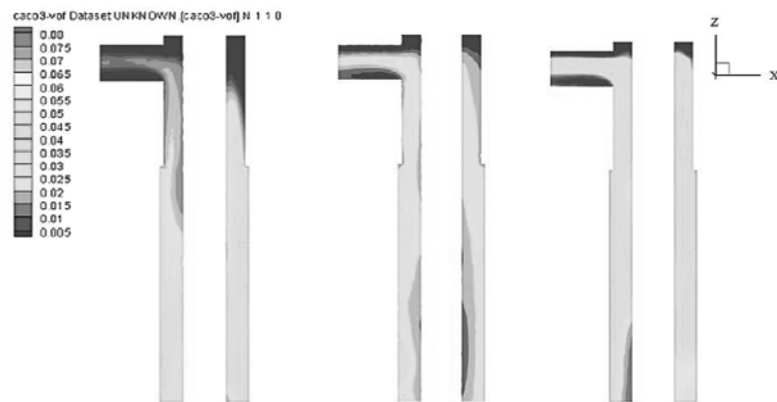
زمان (s)	جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل CFD نوع B (kg)	جرم $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل CFD نوع C (kg)	تفاضل مدل CFD نوع B و C
۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۲۴۱۰۸	۰/۱۱۴۳۴	۰/۱۲۶۷۴
۱۳/۳۴	۰/۰۶۴۰۷	۰/۰۲۵۱۲	۰/۰۳۸۹۵
۱۴/۹۱	۰/۰۱۹۷۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۹۶۷
۱۵/۹۲	۰/۰۰۵۰۷	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۵۰۶
۱۷/۳۱	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۶
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۹۹-۸۴



شکل ۹ نمودار تجمعی $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان برای مدل تجربی، مدل CFD نوع A، نوع B و نوع C

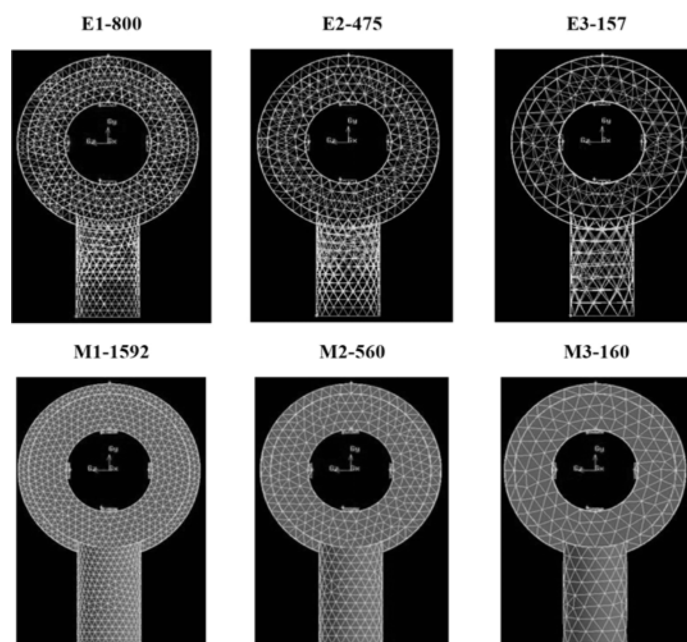
برای تطبیق داده‌های عددی حاصل‌شده با تجربه واقعی از نمونه، شکل ۱۰ به مقایسه نمای مقطع xz حلقه جریانی در زمان ۸ s برای هر سه شبیه‌سازی پرداخته است تا غلظت نقطه‌ای $CaCO_3$ در هر بخش از محدوده خروجی حلقه قابل مشاهده باشد. ده‌ودار و همکارانش، با انجام فرآیندی مشابه برروی مدل تجربی قدیمی شکل ۲ الف به مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدل مذکور پرداخته و از بین مش‌های جدول ۹ مش E2-475 را به‌عنوان مش بهینه انتخاب نمودند [۱۹]. در شکل ۱۱ می‌توان مقایسه‌ای که بین اندازه و چینش مش‌های مدل مذکور به نمایش گذاشته شده است را مشاهده نمود. با استفاده از نمودارهای رسم شده در شکل ۱۲ بررسی استقلال از مش و صحت‌سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی CFD فوق با نتایج حاصل از آزمایش مدل تجربی قدیمی انجام گرفته است [۱۹]. حال که مدل دینامیک سیالات محاسباتی E2-475 به‌دلیل پیش‌بینی نزدیک به داده‌های آزمایش تجربی قدیمی به‌عنوان مش بهینه انتخاب شده است؛ با انتخاب مش B به‌عنوان مش بهینه در شرایطی که نازل‌های سرمته جدید در مدل تجربی کار گرفته شده باشد، مقایسه‌ای خواهیم داشت تا تفاوت‌های موجود در پیش‌بینی مدل CFD از نحوه تخلیه کنده‌های حفاری از فضای دالیزی به‌خوبی مشاهده شود. در شکل ۱۳ نمای گرافیکی غلظت $CaCO_3$ در زمان ۳۰ s در مقاطع xz و xy از حلقه جریانی طراحی شده در مدل E2-475 قابل مشاهده است که نمایانگر کاهش تدریجی غلظت در ابتدای حلقه و حرکت ذرات به سمت خروجی مدل است. لازم به ذکر است، که تفاوت‌های موجود در داده‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌ها صرفاً ناشی از دو عامل اصلی ۱) تفاوت در جرم کنده‌های حفاری اختصاص داده شده به فضای دالیزی در زمان اولیه شروع شبیه‌سازی و ۲) تفاوت‌های ساختاری عملکرد نازل سرمته در دو مدل تجربی و شبیه‌سازی قدیمی و جدید بوده است. در جدول ۱۰ مقایسه‌ای از درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم در مدل‌های CFD نوع B و E2-475 نسبت به یکدیگر و نسبت به هر یک از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته با حلقه قدیمی و جدید ذکر گردیده است. که به‌طور کلی می‌توان نمودار گرافیکی درصد جرم مواد جامد باقی‌مانده در سیستم را برحسب زمان برای هر دو مش بهینه و آزمایش‌های تجربی متناظرشان در شکل ۱۴ به نمایش گذاشت. مجدداً یادآوری می‌گردد.



شـــکل ۱۰ مقایســه غلظـت $CaCO_3$ باقی‌مانـده در مـدل و الگـوی خـروج آن به‌عنـوان پایلـوت در زمـان t=8s در مش‌هـای مختلـف نـوع B، A و C (از راسـت بـه چـپ)

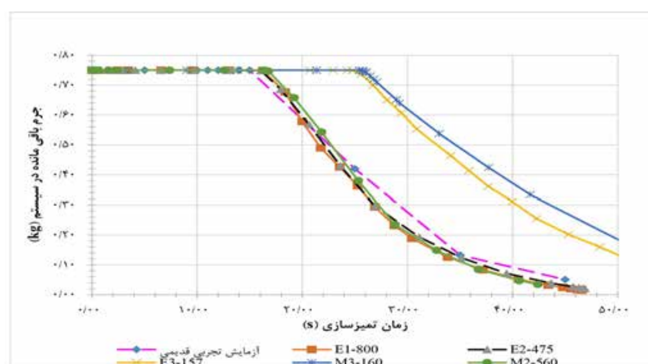
جدول ۹ خصوصیات انواع مش‌های در نظر گرفته شده برای مدل تجربی قدیمی توسط ده‌ودار و همکارانش [۱۹]

فاکتور	E ۱-۸۰۰	E ۲-۴۷۵	E ۳-۱۵۷	M ۳-۱۶۰	M ۲-۵۶۰
نوع مش	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی
تعداد المان‌ها	۸۰۰/۰۰۰	۴۷۵/۰۰۰	۱۵۷/۰۰۰	۱۶۰/۰۰۰	۵۶۰/۰۰۰
نسبت ابعاد (میانگین)	۱۵/۹۹	۱۵/۲۴	۲۵/۹۵	۲۵/۹۵	۱۴/۵۳
چولگی[1] (حداکثر)	۰/۷۵۵	۰/۷۱۰	۰/۸۳۲	۰/۸۳۲	۰/۷۲۱
کیفیت متعامد (حداقل)	۰/۱۸۰	۰/۲۵۰	۰/۶۴۱	۰/۶۴۰	۰/۲۲۵
لایه مرزی	بله	بله	بله	خیر	خیر



شکل ۱۱ مقایسه نمایش مش‌های مدل CFD ده‌ودار و همکارانش از صفحه XY [۱۹]

1. Skewness



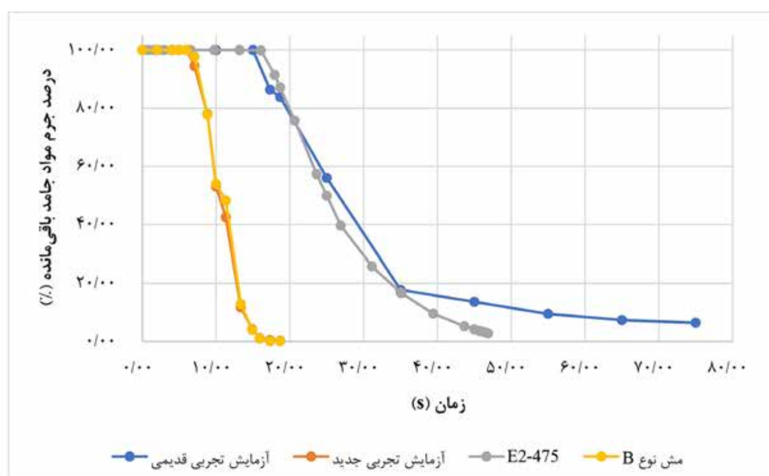
شکل ۱۲ نمودار تجمعی $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان برای مدل تجربی قدیمی و مدل‌های CFD ده‌دوار و همکارانش [۱۹]



شکل ۱۳ نمودار مقدار $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم در زمان t=30s برای مدل E2-475 [۱۹]

جدول ۱۰ مقایسه درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم در مدل‌های CFD نوع B و E2-475 با نتالیج تجربی متناظر

درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل تجربی قدیمی	درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل E2-475 CFD	درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل تجربی جدید	درصد $CaCO_3$ باقی‌مانده در مدل CFD نوع B	زمان (s)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۰
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۴
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۶
۱۰۰	۱۰۰	۹۴/۴۷	۹۷/۷۰	۷/۰۸
۱۰۰	۱۰۰	۷۸/۰۰	۷۷/۸۳	۸/۸۲
۱۰۰	۱۰۰	۵۳/۰۶	۵۳/۹۰	۱۰
۱۰۰	۱۰۰	۴۲/۴۶	۴۸/۲۲	۱۱/۳۲
۱۰۰	۹۹/۹۳	۱۱/۷۱	۱۲/۸۱	۱۳/۳۴
۱۰۰	۹۹/۹۰	۴/۱۷	۳/۹۵	۱۴/۹۱
۱۰۰	۹۹/۸۷	۱/۱۱	۱/۰۱	۱۵/۹۲
۸۶/۳۴	۹۱/۴۶	۰/۴۴	۰/۰۳	۱۷/۳۱
۸۳/۷۶	۸۷/۱۱	۰/۱۹	۰/۰۰	۱۸/۶۹
۵۶/۰۰	۴۹/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۲۵/۰۰
۱۷/۷۳	۱۶/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۵/۰۰
۱۳/۶۰	۴/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۵/۰۰
۹/۴۷	–	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۵/۰۰
۷/۳۳	–	۰/۰۰	۰/۰۰	۶۵/۰۰



شکل ۱۴ نمودار مقایسه درصد جرمی مقدار $CaCO_3$ باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان برای مش‌های بهینه

به‌دلیل تفاوت در ساختار لوله جریان آزمایش جدید با قدیمی، زمان‌بندی خروج کنده‌ها متفاوت بوده که در نمودار با تبدیل جرم باقی‌مانده به درصد جرم باقی‌مانده از اختلاف جرم اولیه موجود در سیستم صرف‌نظر شده است. همچنین برای ثانیه‌های ۵۵ و ۶۵، درصد جرم باقی‌مانده در مش E2-475 محاسبه نشده و آخرین زمان برای این مدل ۴۶/۸۷ s است؛ بنابراین داده‌ای درج نشده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شد تا علاوه‌بر به‌روزرسانی یک مدل آزمایشگاهی و تجربی– با اضافه نمودن نازل‌هایی به سرمته– مدل دینامیک سیالات محاسباتی قدیمی ده‌دوار و همکاران نیز متناظر با مدل تجربی، از طریق مدل CFD جدیدی به‌روز گردد. یکی از نتایج این به‌روزرسانی، شبیه‌سازی بهتر آرایش و شرایط تجهیزات درون‌چاهی است.

پس از بررسی که بین نتایج شبیه‌سازی مدل‌های A، B و C انجام پذیرفت، مشخص شد مدل نوع A توانایی لازم برای شبیه‌سازی عملیات انتقال کنده‌ها را نداشت و مقادیر آن با خطای بالایی نسبت به آزمایش تجربی همراه بود. اجرای شبیه‌سازی در مدل نوع B با حدود ۲۰۰ هزار مش بسیار سریع‌تر و بهینه‌تر از مدل C با بیش از ۵۰۰ هزار مش انجام می‌پذیرد و در فرآیند معتبرسازی و استقلال از مش مشخص شد که تفاوت میان نتایج حاصل از مدل B و C نیز چشم‌گیر نیست؛ اما با توجه به زمان لازم برای اجرای شبیه‌سازی (حدود ۶۰ h برای مدل C در برابر ۲۲ h برای مدل B) قطعاً استفاده از مدل B منطقی خواهد بود. علاوه‌بر این از نتایج موجود در مقاله‌ای به سال ۲۰۱۹ که توسط ده‌دوار و همکارانش به مقایسه تاثیر مشخصات مش مدل‌های CFD برروی شبیه‌سازی مدل تجربی قدیمی پرداخته شده بود نیز استفاده شد، تا علی‌رغم تفاوت‌هایی چون جرم کنده‌های موجود در مدل و تفاوت‌های فیزیکی مدل‌ها، عملکرد پیش‌بینی رفتار مدل نوع B با مدل بهینه انتخابی E2-475 نیز مقایسه گردد که از لحاظ تعداد مش کمتر و خطای نسبی کمتر در مقایسه با مدل تجربی متناظر، مدل B در این مقایسه نیز به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

علائم و نشانه‌ها

α: زاویه چاه

ϕ: زاویه بستر کنده

ρ: چگالی سیال

ρ_p: چگالی کنده

q_s: دمای دانه‌ای در دیواره چاه

p_s: فشار جامد

d_p: قطر کنده
K_{θ_s}: ضریب انتشار برای انرژی دانه‌ای
$\vec{g}$: تابع توزیع شعاعی
θ_S: دمای دانه‌ای
γ_{θ_s}: انرژی تلف‌شده در برخورد
τ_s: زمان آسایش
φ_{ls}: تبادل انرژی بین فازی
$\alpha_{p/s}$: کسر حجمی کنده/سیال
K_{ls}: ضریب تبادل بین فازی
$\overline{\overline{\tau_s}}$: تانسور تنش-کرنش
$\overrightarrow{F_{vms}}$: نیروی جرم مجازی
τ_y: نقطه واروی سیال حفاری
τ: تنش برشی
ρ_c: چگالی جریانی معادل
v_x: سرعت سیال در جهت جریان
C_{Drag}: ضریب کشش
C_{lift}: ضریب برآ

مراجع

[1]. Zhang F, Miska S, Yu M, Ozbayoglu E, Takach N, Osgouei R E (2015) Is well clean enough? a fast approach to estimate hole cleaning for directional drilling, SPE/ ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/173681-MS.
[2]. Cayeux E, Leulseged A, Kluge R, Haga J (2016) Use of a transient cuttings transport model in the planning, monitoring and post analysis of complex drilling operations in the north sea, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/178862-MS.
[3]. Han S M, Woo N S, Kim Y J (2016) A study of the particle transport in the non-newtonian fluid with inclined annulus, Asia-Pacific Journal of Modeling and Simulation for Mechanical System Design and Analysis, 1, 1: 23-28.
[4]. Ayeni O O, Wu C L, Nandakumar K, Joshi J B (2016) Development and validation of a new drag law using mechanical energy balance approach for DEM–CFD simulation of gas–solid fluidized bed, Chemical Engineering Journal, 302: 395-405, doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.056.
[5]. Li J, Luft B (2014) Overview solids transport study and application in oil-gas industry-theoretical work, International Petroleum Technology Conference, doi.org/10.2523/IPTC-17832-MS.
[6]. Falcone G (2009) Flow loops for validating and testing multiphase flow meters, Developments in Petroleum Science, 54: 295-302, doi.org/10.1016/S0376-7361(09)05409-0.
[7]. Duan M, S M, Yu M, Takach N, Ahmed R, Zettner C (2007) Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells, Paper Presented at the SPE 106707, Oklahoma, U.S.A., 24: 2, doi.org/10.2118/106707-PA.
[8]. Corredor F E R, Bizhani M, Kuru E (2016) Experimental investigation of cuttings bed erosion in horizontal wells using water and drag reducing fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering, 147: 129-142, doi.org/10.1016/j.petrol.2016.05.013.
[9]. Egenti N B (2014) Understanding drill-cuttings transportation in deviated and horizontal wells, Paper presented at the SPE-172835-MS, Lagos, Nigeria, doi.org/10.2118/172835-MS.
[10]. Nazari T, Hareland G, Azar J J (2010) Review of cuttings transport in directional well drilling- systematic approach, Paper Presented at the SPE, Anaheim, California, U.S.A., doi.org/10.2118/132372-MS.
[11]. Bizhani M, Rodriguez-Corredor F E, Kuru E (2015) Hole cleaning performance of water vs. polymer-based fluids under turbulent flow conditions, Paper presented at the SPE, Alberta, Canada, doi.org/10.2118/174404-MS.
[12]. Baldino S, R E O, Ozbayoglu E, Miska S, Takach N, May R, Clapper D (2015) Cuttings settling and slip velocity evaluation in synthetic drilling fluids, Paper presented at the 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, ISBN: 0788894043648.
[13]. Valluri S G, Miska S Z, Yu M, Ahmed R M, Takach N (2007) Experimental study of effective hole cleaning using sweeps in horizontal wellbores, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/101220-MS.
[14]. Duan M S M, Yu M, Takach N, Ahmed R, Zettner C (2008) Transport of small cuttings in extended-reach drilling, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/104192-MS.
[۱۵]. ده‌ودار م، همایون م (۱۴۰۰) مهندسی حفاری، جلد یکم: سیال حفاری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱-۳۷۴، ISBN: ۹۷۸۹۶۴۴۶۳۸۲۹۹.

[۱۶]. انـوری، ح (۱۳۸۷) مدل‌سـازی عـددی انتقـال کننده‌هـای حفـاری بـه همـراه مطالعـه پارامتـری عوامـل موثـر بـر آن در یکـی از میادیـن نفتـی جنـوب ایـران؛ پایـان نامـه کارشناسـی ارشـد دانشـگاه صنعتـی امیرکبیـر، ۱-۹۲.
[۱۷]. ده‌ودار م، معارف‌ونـد، پ، فضائلـی‌زاده م، مروجـی کشـاورز م (۱۳۹۶) مـروری بـر پارامترهـای اثرگـذار در مطالعـات تجربـی و دینامیـک سـیالات محاسـباتی حمـل کنده‌هـای حفـاری در فضـای دالیـزی چـاه، اکتشـاف و تولیـد نفـت و گاز، ۱۴۵: ۵۹-۶۷..
[18]. Dehvedar M, Moarefvand P (2019) Detecting and drilling in critical inclination window in slant wells by means of a two-phase liquid-solid CFD model and experimental study, Kuwait Journal of Science, 46, 2: 74-84.
[19]. Dehvedar M, Moarefvand P, Kiyani A R (2019) A liquid–solid two-phase flow computational fluid dynamic modelling of the operational characteristics effects on the cleaning time of a circulating flow loop, South African Journal of chemistry, 72: 67-79, dx.doi.org/10.17159/0379-4350/2019/v72a10.
[20]. Zeidler H Udo (1970) An experimental analysis of the transport of drilled particles, SPE 3064 presented at the SPE 45th Annual Meeting, Houston, 12, 01: 39–48, doi.org/10.2118/3064-PA.
[21]. Sifferman R T (1979) Drill cutting transport in full scale vertical annuli, SPE 4514 presented in the 48th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers held in Las Vegas, Nevada, 26, 11: 1295–1302, doi.org/10.2118/4514-PA.
[22]. Belavadi M N, Chukwu G A (1994) Experimental study of the parameters affecting cuttings transportation in a vertical wellbore annulus, SPE Western Regional Meeting, Long Beach, California, doi.org/10.2118/27880-MS.
[23]. Waker S, J Li (2000) The effect of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cutting transport, SPE 60755 Presented at the 2000 SPE, ICTA Coiled Tubing Roundtable held in Houston, TX, doi.org/10.2118/60755-MS.
[24]. Pigott R J S (1941) Mud Flow in Drilling", Drilling and Production Practice, API.
[25]. Martin M (1987) Transport of cuttings in directional wells, paper SPE / IADC 16083 presented at the SPE / IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, doi.org/10.2118/16083-MS.
[26]. Seeberger M H, Matlock R W, Hanson P M (1989) Oil muds in large – diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problems, paper SPE / IADC 18636 Presented at the SPE / IADC Drilling Conference, New Orleans, Lousiana, doi.org/10.2118/18635-MS.
[27]. Okranji S S, Azar J J (1985) Mud cutting transport in directional well drilling, paper SPE 14178 presented at the annual meeting in Las Vegas, Nevada, doi.org/10.2118/25871-MS.
[28]. Bilgesu H I (2002) Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores, SPE 78716 paper Eastern Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/78716-MS.
[29]. Byrne M T (2011) Computational fluid dynamics for reservoir and well fluid flow performance modelling, SPE European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/144130-MS.
[30]. Akhshik S, Behzad M, Rajabi M (2016) CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape, Particuology, 25: 72-82, doi.org/10.1016/j.partic.2015.02.008.
[31]. Mme U, Skalle P (2012) CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles, International Journal of Petroleum Science and Technology, 6: 129-141, ISSN 0973-6328.
[32]. Hajipour M (2020) CFD simulation of turbulent flow of drill cuttings and parametric studies in a horizontal annulus, SN Applied Sciences 2: 1-12.
[۳۳]. مشعشـعی س ح، ابراهیم‌آبـادی آ، امامـزاده ا (۱۳۹۷) ارائـه ابـزار گرافیکـی بـه منظـور پیش‌بینـی نـرخ نفـوذ حفـاری بـا اسـتفاده از شـبکه‌های هوشـمند. پژوهـش نفـت، ۲۸، (۹۷-۴)، ۱۲۵-۱۱۲.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۰۷-۱۰۰

استفاده از روش‌های بهینه‌یابی فراابتکاری جستجوی گرانشی، ازدحام ذرات و ترکیب آن‌ها در مدل‌سازی شبکه شکستگی

سیما شکیبا[۱و۲] و فرامرز دولتی ارده‌جانی*[۱و۲]

۱- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۲- گروه تحقیقاتی هیدروژئولوژی و محیط‌زیست معدنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

چکیده

مدل‌سازی محیط شکسته پیش نیاز اصلی شبیه‌سازی جریان سیال در بسیاری از کاربردها مانند مدیریت منابع آب زیرزمینی، شبیه‌سازی مخازن نفت و گاز، مدل‌سازی منابع انرژی زمین گرمایی و غیره است. هدف از این مطالعه، توسعه یک روش تکرارشونده مبتنی بر شی جهت مدل‌سازی محیط شکسته گسسته است که هم پارامترهای آماری و هم اتصال فضایی شکستگی‌ها را در نظر می‌گیرد. روش ارائه شده از توابع ماتریس‌های همسایگی شکستگی در پردازش تصویر استفاده می‌کند تا اتصال شکستگی‌ها را واضح‌تر کند و توزیع فضایی آن‌ها را با استفاده از ماتریس‌های تشخیص سلول شکستگی به‌هم پیوسته، ماتریس سوبل، ماتریس پرویت و ماتریس لاپلاسین مشخص کند. تابع هدف تفاوت بین ویژگی‌های محیط شکسته مرجع و مدل تولید شده را با استفاده از معیار نرم دو تعریف می‌کند. برای حل این تابع هدف، از روش‌های بهینه‌یابی جستجوی گرانشی، ازدحام ذرات و هیبرید این دو روش فراابتکاری استفاده شده است. برای اجرای این روش، شبکه مصنوعی دارای شکستگی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد از میان روش‌های فوق، روش فراابتکاری ازدحام ذرات با دقت ۹۸/۸۹٪ شکستگی در شبکه شکسته را بازتولید می‌کند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی شبکه شکسته، روش‌های بهینه‌یابی چند متغیره، روش ازدحام ذرات، روش جستجوی گرانشی، شبکه شکستگی

مقدمه

در طول سالیان گذشته، رویکردهای متنوع و گسترده‌ای برای مدل‌سازی جریان سیال و انتقال جرم در یک فضای متخلخل-شکسته صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، آبوسادا و سوتر [۱] و کو و همکاران نسبت به مدل‌سازی محیط‌های متخلخل یکنواخت (EPM) [1] اقدام کرده‌اند [۲]. استفاده از روش محیط شکسته گسسته (DFN) [2] توسط هارتلی و روبرت [۳] و نیومان [۴] به منظور کمی‌سازی جریان سیال و انتقال آلاینده انجام شده است.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی fdoulati@ut.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4960.3210)

1. Equivalent Porous Medium
2. Discrete Fracture Network

همچنین، کومار جریان سیال در محیط‌هایی با تخلخل دوگانه [۵] و وو و همکاران فضاهایی با تخلخل سه‌گانه [۶] را مورد بررسی قرار داده‌اند. مدل پیوستگی تصادفی (SC) توسط سینگال و گوپتا مورد استفاده قرار گرفته است [۷]. همچنین، شبیه‌سازی پیوسته شکستگی با استفاده توامان از داده‌های لرزه‌ای، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی انجام شده است [۸]. از دیگر روش‌های تخمین شکستگی می‌توان به استفاده از تصاویر ریزمقاومت سازندی [۹] و نمودارهای پترفیزیکی [۱۰] اشاره کرد. روش شبیه‌سازی زمین‌آماری چند نقطه‌ای (MPS) روشی نوین در بازتولید توزیع احتمال توأم متغیرهای مورد نظر در سیستم زمین‌شناسی واقعی می‌باشد که کاربرد موفق آن در مدل‌سازی پیوستگی شکستگی‌ها یا نفوذپذیری از مرتبه بالا در شبیه‌سازی مخازن نفتی، سنگ سخت و آبخوان‌های رسوبی [۱۱ و ۱۲] و نهشته‌های معدنی مشخص شده است.

پیشرفت‌های اخیر در شبیه‌سازی زمین‌آماری، به‌کارگیری روش‌هایی مبتنی بر تصاویر آموزشی است که امکان دستیابی به دانش کیفی زمین‌شناسی در مدل‌ها را فراهم می‌آورد) [۱۳- ۱۸]. یک مفهوم جدید با استفاده از ایده بهینه‌سازی (با روش پرش قابل برگشت مارکوف مونت کارلو، rjMCMC) برای تولید محیط دارای شکستگی دو بعدی گسسته (DFN) توسط سوموگیواری و همکاران، از آزمایشات توموگرافی ردیاب استفاده شد [۱۹]. با این حال، روش‌های مدل‌سازی محیط شکسته سنتی اغلب در مدل‌سازی تغییرپذیری فضایی شکست می‌خورند و به‌سادگی هندسه‌های شکستگی را با توزیع احتمال آماری نشان می‌دهند. در سال‌های اخیر روش‌های جایگزین متعددی برای پاسخگویی به این نقص پیشنهاد شده است. نمونه‌هایی از روش‌های ارائه شده برای در نظر گرفتن توزیع فضایی در فرآیند مدل‌سازی محیط شکسته ارائه شده است که شامل ۱- استفاده از روش شبیه‌سازی گاوسی متوالی (SGS)[1] [۲۰]، ۲- پیشنهاد روش مبتنی بر بهینه‌یابی با استفاده از روش تبرید شبیه‌سازی شده (SA)[2] [۲۱ و ۲۲]، ۳- پیشنهاد یک طرح حجم محدود سلول محور با روش تقریب شار چند نقطه‌ای [۲۳]، ۴- معرفی یک مدل‌سازی و روش شناسایی ترکیبی از قطعی- احتمالاتی (DSIM)[3] با استفاده از داده‌های اسکن لیزری [۲۴]، و ۵- استفاده از روش کریجینگ معمولی [۲۵] می‌شود.

یک مشکل رایج در روش‌های موجود، اثر نرم‌شدگی است که عمدتاً به‌دلیل استفاده از آمار دو نقطه‌ای است. این مشکل زمانی آشکارتر می‌شود که پارامتر مهمی مانند اتصال شکستگی برای مدل‌سازی در نظر گرفته شود. برای مدل‌سازی محیط شکسته گسسته، آمار دو نقطه‌ای نمی‌تواند ابزار مفیدی باشد زیرا اتصال و تغییرپذیری شکستگی‌ها را نادیده می‌گیرد. برای داشتن یک تحقق مطمئن‌تر از سنگ دارای شکستگی، روش‌های مبتنی بر الگو به‌عنوان یک تکنیک برتر شناخته شده‌اند و اغلب در برنامه‌های کاربردی بازسازی تصویر و مواجهه با مشکل نمونه‌گیری جزئی مورد استفاده قرار می‌گیرند (ماریتوز و همکاران، [۲۶]. با این حال، استفاده از روش‌های زمین‌آمار چند نقطه‌ای امکان بازتولید شکستگی‌های با طول بلند را ندارد. در مطالعات پیشین، تنها توابع توزیع آماری جهت مدل‌سازی شبکه شکستگی مورد استفاده قرار می‌گرفت و به مسأله مدل‌سازی پارامترهای فضایی نظیر پیوستگی و موقعیت قرارگیری شکستگی پرداخته نمی‌شد. استفاده از روش‌های زمین‌آماری هم به‌دلیل عدم مدل‌سازی مقادیر بیشینه و کمینه در زمین‌آمار دو نقطه‌ای و عدم بازتولید شکستگی‌ها با طول بزرگ‌تر در زمین‌آمار سه نقطه‌ای در مدل‌سازی شبکه شکستگی استفاده نمی‌شود.

1. Sequential Gaussian Simulation
2. Simulated Annealing
3. Deterministic-Stochastic Identification and Modeling

بنابراین، در این مطالعه یک تابع هدف به گونه‌ای که پارامترهای آماری و فضایی (زمین‌آماری) فضای شکستگی را بازتولید کند، معرفی می‌شود. برای حل تابع هدف و جلوگیری از یافتن پاسخ محلی، از روش‌های فراابتکاری استفاده شده است.

روش‌شناسی

تابع هدف

هدف از این پژوهش ارائه روشی است که بتواند با دقتی مطلوب نسبت به بازتولید یک محیط شکسته اقدام کند. برای این منظور، موضوع مورد بحث به‌صورت یک مسأله بهینه‌یابی مطرح می‌شود؛ به‌نحوی‌که مدل‌سازی با یک مدل اولیه (حدس اولیه) شروع شده و سپس با یک فرآیند تکرار شدنی و در مسیر بهینه‌سازی آن، به روزرسانی شده و به واقعیت مورد مشاهده نزدیک می‌شود. مدل بهینه شده بایستی پارامترهای آماری (همچون ابعاد، راستا و چگالی توزیع شکستگی در واحد سطح (حجم) و ...) واقعیت مشاهده شده را با کمترین اختلاف بازتولید نموده و در عین حال خصوصیات فضایی و مکانی آن‌ها را نیز شبیه‌سازی کند. با استفاده از یک تولید کننده شکستگی آماری، یک پیکربندی از محیط شکسته اولیه ایجاد می‌شود و سپس ویژگی‌های فضایی آن با به‌کارگیری یک روش بهینه‌یابی جهانی[1] جهت به حداقل رساندن یک تابع هدف گنجانده می‌شود. با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی جهت حل تابع هدف، تحقق‌هایی از شبکه شکستگی تولید می‌شود و این مرحله تا جایی تکرار می‌شود که نزدیک‌ترین تحقق به شبکه شکستگی مرجع بازتولید شود. برای توصیف تغییرپذیری فضایی شبکه‌ی شکستگی، از ماتریس‌های همسایگی شکستگی استفاده می‌شود. در شکل ۱ از ماتریس همسایگی یک ماتریس مربعی است (ماتریس ۳×۳ در این مطالعه) که برای جستجوی وجود یک سلول حاوی شکستگی (وجود یک سلول حاوی سنگ بکر) روی سلول‌های مجاور یک سلول مرکزی در نقشه شکستگی استفاده می‌شود. ماتریس‌های همسایگی شکستگی مورد استفاده در این مطالعه، مشتق فضایی میدان شاخص داده شده را محاسبه می‌کنند و می‌توانند به دو گروه اصلی ماتریس‌های مبتنی بر مشتق فضایی اول و ماتریس‌های مبتنی بر مشتق فضایی دوم دسته‌بندی شوند.

P1	P2	P3
P4	P5	P6
P7	P8	P9

شکل ۱ ماتریس جستجوی محیط شکسته

ماتریس‌های همسایگی شکستگی مورد استفاده در این مطالعه، مشتق فضایی میدان شاخص داده شده را محاسبه می‌کنند و می‌توانند به دو گروه اصلی ماتریس‌های مبتنی بر مشتق فضایی اول و ماتریس‌های مبتنی بر مشتق فضایی دوم دسته‌بندی شوند. ماتریس‌های گروه اول از مشتقات مرتبه اول استفاده می‌کنند و تغییرات شدید (لبه‌ها) را که در نتیجه عبور از یک سلول شکستگی به یک سلول سنگ بکر رخ می‌دهد، تشخیص می‌دهند. مناطق بدون هیچ سلول شکستگی، گرادیان صفر را برمی‌گردانند، درحالی‌که مناطق دیگر مقداری مثبت یا منفی را خروجی می‌دهند. بنابراین، با یافتن سلول‌های حاصل از حداکثر انحرافات اولیه، می‌توان شکستگی در یک آبخوان دارای شکستگی را تشخیص داد. گرادیان یک آبخوان دارای شکستگی با مقادیر سلولی f (x,y) در جهت x و y را می‌توان از طریق رابطه زیر به‌دست آورد:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1,y) - f(x-1,y) \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = f(x,y+1) - f(x,y-1)$$

1. Global Optimization Algorithm

در این مطالعه، برای تشخیص سلول‌های به‌هم پیوسته دارای شکستگی از ماتریس‌های سوبل و پرویت که مفیدترین عملگرهای مبتنی بر گرادیان هستند، استفاده شده است. برخلاف روش‌های ماتریس گرادیان، دومین روش استفاده از ماتریس مبتنی بر مشتق فضایی (لاپلاسی) است یا مشتقات فضایی دوم یک آبخوان دارای شکستگی را اندازه‌گیری می‌کند و منطقه تغییرات با مقدار برجسته را مشخص می‌کند. مقدار لاپلاس L (x,y) یک آبخوان دارای شکستگی با مقادیر سلولی f (x,y) توسط رابطه زیر مشخص شده است [۲۷]:

$$L(x,y)=\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} \qquad (۲)$$

اعمال هر دو گروه ماتریس برروی یک محیط شکسته توسط عملگر کانولوشن، منجر به تولید یک میدان جدید می‌شود که هر نقطه حاوی تقریب‌های مشتق است. سپس مقادیر تقریبی گرادیان به‌دست‌آمده در هر مکان سلول ماتریس با محاسبه عملگر جمع ترکیب می‌شوند. اندازه کوچک ماتریس‌ها در استخراج پارامترهای شبکه شکستگی مرجع موفق‌تر هستند. همچنین، اندازه ماتریس‌های بزرگتر به‌زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارد و آنچه در این مطالعه مهم است، بررسی ارتباط بین سلول‌های مجاور برای ردیابی تداوم شکستگی و توزیع فضایی شکستگی است. تابع هدف، جمع وزنی چهار قید محدودیت است که توسط توابع فیلتر فوق الذکر برای کنترل به‌روزرسانی شبکه‌بندی تعریف شده است. در واقع، روش ارائه شده باید شبکه‌بندی اولیه را به‌گونه‌ای تغییر دهد که تفاوت بین مدل شکست اولیه (به‌دست آمده از شبکه شکست آماری تولید شده) و مدل مرجع را به حداقل برساند. این امر با کمینه کردن تابع هدف زیر حاصل می‌شود:

$$f=\min\{w_1\|N_{1GSFN}-N_{1ref}\|+w_2\|N_{2GSFN}-N_{2ref}\| +w_3\|N_{3GSFN}-N_{3ref}\|+w_4\|N_{4GSFN}-N_{4ref}\|\} \qquad (۳)$$

که در آن، w_i فاکتورهای وزنی است که تأثیر هر قید محدودیت را بر تابع هدف کنترل می‌کند و در تکرارها بهینه می‌شود. تابع هدف مورد نظر بایستی قابلیت آن را داشته باشد که چهار محدودیت مرتبط با خصوصیات شکستگی‌ها را توأمان بهینه کند.

روش‌های بهینه‌یابی

از نظر توانایی در یافتن پاسخ بهینه، روش‌ها و روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به دو دسته روش‌های دقیق و روش‌های تقریبی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های دقیق (مانند روش‌های گرادیانی) قادر به یافتن جواب بهینه به‌صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی، کارایی کافی ندارند و زمان اجرای آن‌ها متناسب با ابعاد مسائل به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. روش‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های قابل قبول (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌یابی هستند. این روش‌ها را می‌توان به سه دسته روش‌های ابتکاری[۱] و فراابتکاری[۲] و فوق ابتکاری[۳] بخش‌بندی نمود. دو مشکل اصلی روش‌های ابتکاری، گیر افتادن آن‌ها در نقاط بهینه محلی و هم‌گرایی زودرس به این نقاط است. روش‌های فراابتکاری برای حل این مشکلات روش‌های ابتکاری ارائه شده‌اند. در واقع روش‌های فراابتکاری، یکی از انواع روش‌های بهینه‌یابی تقریبی هستند که دارای راه‌کارهای برونرفت از نقاط بهینه محلی بوده و قابلیت کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارند. به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین بخش‌های فرآیند مدل‌سازی و به‌جهت بازتولید توزیع فضایی شکستگی‌ها، خصوصیات آماری و نیز فضایی محیط شکسته به‌صورت قیودی مجزا در نظر گرفته شده و در تابع هدف تعریف شده اعمال می‌شود. نحوه کار به این صورت خواهد بود که هریک از این قیود، در حقیقت به‌صورت یک تابع اختلاف[۴] تعریف شده و با ضریب مختص به آن در تابع هدف نهایی وارد می‌شود.

1. Heuristic
2. Meta-Heuristic
3. Hyper-Heuristic
4. Misfit Function

سپس از روش‌های بهینه‌یابی در نظر گرفته استفاده شده و تمامی این قیود به‌صورت توأمان بهینه می‌شوند. شرط توقف زمانی و یا رسیدن به پاسخ بهینه زمانی حاصل خواهد شد که جواب به‌دست آمده در آن تکرار نزدیک به‌واقعیت بوده و کمترین خطا را داشته باشد. نقطه شروع این روش یک هندسه تصادفی و با مشخصات شکستگی تصادفی است که به‌عنوان حدس اولیه در نظر گرفته شده و سپس در یک فرآیند تکرارشدنی و با توجه به‌روش جستجوی روش بهینه‌یابی در نظر گرفته شده به‌روز رسانی خواهند شد تا جایی که با داده‌های مشاهده شده سازگار شود. روش ارائه شده دارای دو فاز اصلی آماده‌سازی داده‌ها و مدل‌سازی است.

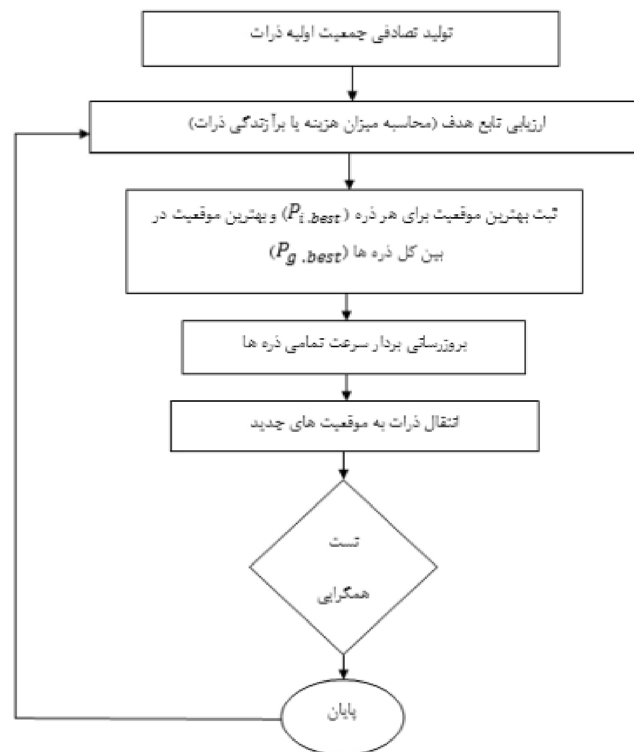
هر فاز دارای سه مرحله است، با این تفاوت که مراحل فاز اول نسبتاً ساده است، اما در فاز دوم حلقه تکرار در نظر گرفته می‌شود. در فاز مدل‌سازی، ابتدا از طریق تولیدکننده شبکه آماری شکستگی یک محیط شکسته اولیه ایجاد می‌شود. پیکربندی فعلی به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که تفاوت بین تصویر مدل‌سازی شده و مدل مرجع از طریق کمینه‌سازی تابع هدف توسط روش بهینه‌یابی فراابتکاری کاهش یابد. مرحله نهایی، مقایسه نتایج حاصل از مرحله قبل با مدل واقعی از طریق معیارهای ارزیابی است. درصورتی‌که بین محیط شکسته مدل‌سازی شده و مرجع تفاوت معنی داری وجود داشته باشد این فرآیند تا رسیدن به محیط شکسته مورد نظر تکرار می‌شود. از دیگر پارامترهای مؤثر در فرآیند بهینه‌سازی، انتخاب یک شبکه شکستگی اولیه است به گونه‌ای که از نظر تابع توزیع طول، زاویه و چگالی شکستگی با تابع توزیع مدل مرجع یکسان باشد. در این صورت، زمان همگرایی پاسخ بهینه‌سازی در بازه کمتری انجام می‌شود.

بررسی نتایج مدل‌سازی محیط شکسته با استفاده از داده مصنوعی

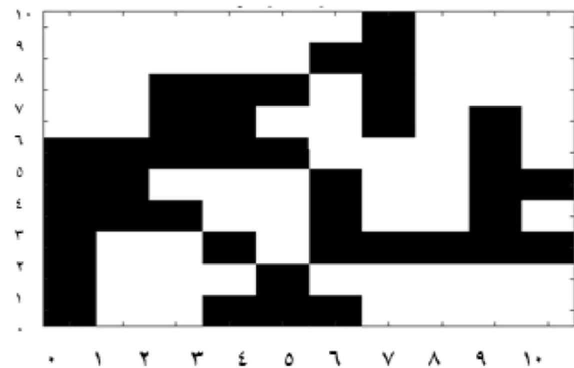
برای ساخت یک مدل مصنوعی شکستگی به‌عنوان محیط شکسته، یک مسأله بهینه‌یابی مطرح شده و برای رسیدن به نقطه پاسخ بهینه از روش‌های بهینه‌یابی فراابتکاری استفاده خواهد شد. از میان روش‌های فراابتکاری، روش‌های بهینه‌یابی ازدحام ذرات (PSO)[1]، روش جستجوی گرانشی و هیبرید این دو روش برای حل تابع هدف برروی داده‌های مصنوعی تولید شده شکستگی در محیط MATLAB و با ابعاد ۱۰*۱۰ به‌کار گرفته می‌شود. PSO یک روش قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌یابی پیچیده است. این روش هم در شاخه‌های علوم و هم در شاخه‌های مهندسی به‌دلیل اثربخشی و تنظیم آسان پارامترهای آن مورد توجه قرار گرفته است [۲۸]. مراحل روش PSO در شکل ۲ آورده شده است.

در شکل ۳ تصویر داده‌های مصنوعی دارای شکستگی با ابعاد ۱۰*۱۰ به‌عنوان تصویر مرجع و در شکل ۴ مدل اولیه از شبکه دارای شکستگی آورده شده است. با یافتن مقدار بهینه تابع هدف از طریق روش‌های فراابتکاری ازدحام ذرات، روش جستجوی گرانشی و هیبرید آن دو، به‌ترتیب بازتولید از مدل مرجع در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، روش فراابتکاری ازدحام ذرات در یافتن پاسخ بهینه تابع هدف نسبت به دو روش دیگر ذکر شده، یعنی روش جستجوی گرانشی و هیبرید، با دقت بیشتری سلول شکستگی را به‌عنوان سلول شکستگی و سلول ماتریکس را به‌عنوان ماتریکس بازتولید کرده است. با استفاده از تبدیل محیط شکسته مرجع به محیط شکسته صفر و یک، امکان ارزیابی صحت طبقه‌بندی حاصل می‌شود. جدول ۱ ارزیابی صحت طبقه‌بندی تمام سلول‌های پر شده، با در نظر گرفتن نقشه شکستگی بازیابی شده مدل مرجع توسط روش ارائه شده، را نشان می‌دهد. نرخ صحت طبقه‌بندی (CCR) ۰/۹۹ است که دقت روش ارائه شده را در بازسازی محیط شکسته مورد نظر اثبات می‌کند.

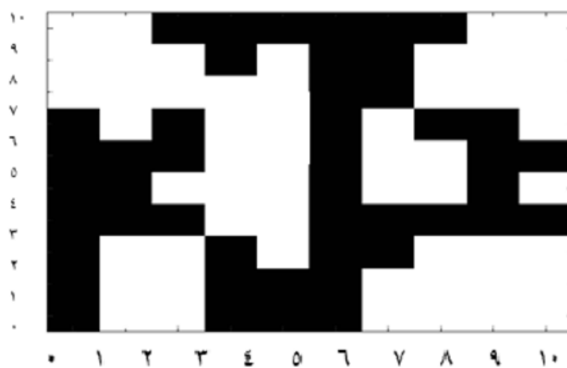
1. Particle Swarm Optimization



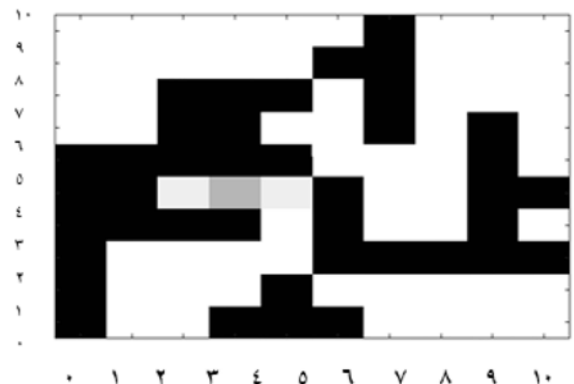
شکل ۲ مراحل روش ازدحام ذرات



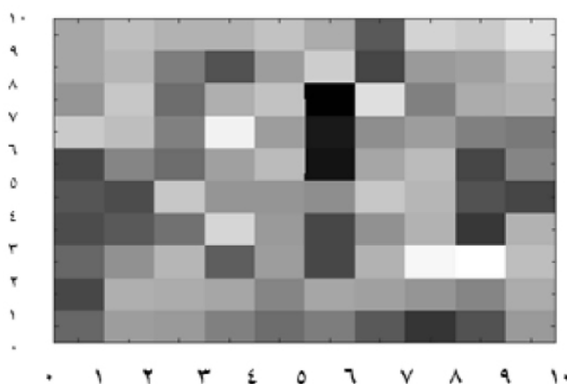
شکل ۳ داده مصنوعی مرجع دارای شکستگی با ابعاد ۱۰*۱۰



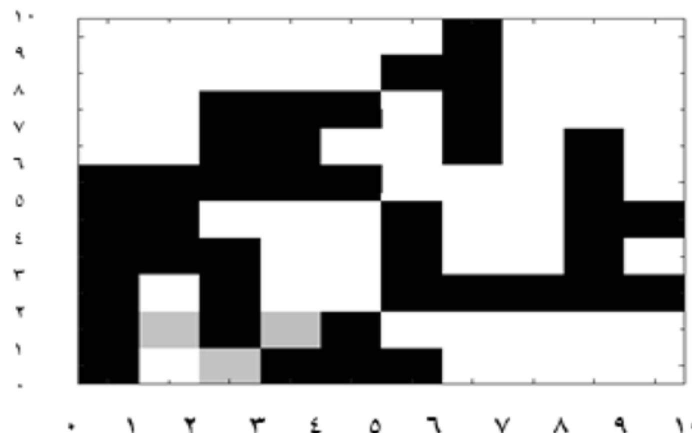
شکل ۴ مدل اولیه دارای شکستگی



شکل ۵ بازتولید داده مصنوعی مرجع دارای شکستگی با استفاده از روش ازدحام ذرات



شکل ۶ بازتولید داده مصنوعی مرجع دارای شکستگی با استفاده از روش جستجوی گرانشی



شکل ۷ بازتولید داده مصنوعی مرجع دارای شکستگی با استفاده از روش هیبرید ازدحام ذرات و جستجوی گرانشی

جدول ۱ صحت طبقه‌بندی مرجع مدل‌سازی شده توسط روش ازدحام ذرات

	سلول ماتریس در مدل بازتولید شده	سلول شکستگی در مدل بازتولید شده
سلول ماتریس در مدل مرجع	۹۹/۱۵	۰/۸۵
سلول شکستگی در مدل مرجع	۱/۱۱	۹۸/۸۹

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، موضوع مدل‌سازی استاتیک آبخوان دارای شکستگی به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندگانه مطرح شده و تلاش می‌شود با در نظر گرفتن یک مدل اولیه و حل یک مسأله بهینه‌سازی به‌مدل واقعی نزدیک می‌شود. تابع هدف نوشته شده در این مسأله بهینه‌یابی، باید دو قید اصلی بازتولید خصوصیات آماری شکستگی و نیز بازتولید خصوصیات توزیع فضایی شکستگی را دارا باشد. این قیود به صورت توابع اختلافی (مجموعاً پنج تابع اختلاف) تعریف شده و در تابع هدف گنجانده می‌شوند. جواب مسأله، زمانی حاصل خواهد شد که در تابع هدف در نظر گرفته شده به طور توأمان تمام توابع اختلاف، بهینه شده و کمترین مقدار برای تابع هدف حاصل شود. همچنین برای حل این مسأله، از روش‌های بهینه‌یابی فرا ابتکاری ازدحام ذرات و گرانشی و نیز هیبرید این دو روش استفاده و بهترین روش بهینه‌یابی فراابتکاری معرفی شد. با حل تابع هدف با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات با نرخ صحت طبقه‌بندی (CCR) ۰/۹۹ شبکه شکستگی مرجع را بازتولید کرد.

مراجع

[1]. Abusaada M, Sauter M., 2013, Studying the flow dynamics of a karst aquifer system with an equivalent porous medium model. Groundwater 51:641–650, doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.01003.x.

[2]. Ko N Y, Ji S H, Koh Y K, Choi J W (2015) Evaluation of two conceptual approaches for groundwater flow simulation for a rock domain at the block-scale for the Olkiluoto site, Finland. Engineering Geology 193: 297–304, doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.003.

[3]. Hartley L, Roberts D (2013) Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm.

[4]. Neuman S P (2005) Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, Hydrogeology Juornal, 13:124–147.

[5]. Kumar G S (2014) Mathematical modeling of groundwater flow and solute transport in saturated fractured rock using a dual-porosity approach, Journal Hydrogeology Engineering, 19: 12, 04014033. doi:10.1061/(ASCE)HE. 1943-5584.0000986.

[6]. Wu Y S, Liu H, Bodvarsson G (2004) A triple-continuum approach for modeling flow and transport processes in fractured rock, Journal of Contaminate Hydrogeology, 73:145–179, doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.01.002.
[7]. Singhal B B S, Gupta R P (2010) Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 221–236, DOI: 10.1007/978-90-481-8799-7_12.
[۸]. بیات ع ا، اصغری ا، بحرودی ع، توکلی م (۱۳۹۴) مدل‌سازی پیوسته شکستگی در مخازن کربناته با تلفیق داده‌های لرزه‌ای، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی، پژوهش نفت ۲۵، ۸۳: ۹۶-۱۰۷.
[۹]. صادقی ل، حسنپور صدقی م، کدخدایی ع (۱۴۰۱) تحلیل تکتونیکی یکی از میادین نفتی جنوب‌غرب ایران، با استفاده از نمودار تصویری FMI، پژوهش نفت، ۳۲: ۱۴۰۱-۶، doi:10.22078/PR.2022.4611.3077.
[۱۰]. عقلی ق، سلیمانی ب، چرچی ع، زحمتکش ا (۱۳۹۵) تعیین روشی نوین برای شناسایی زون‌های شکسته بر روی نمودارهای پتروفیزیکی و تطابق آن با نمودارهای تصویرگر، پژوهش نفت، ۲۶، ۱-۹۵: ۱۲۰-۱۶۴.
[11]. Huysmans M, Orban P, Cochet E, Possemiers M, Ronchi B, Lauriks K, Batelaan O, Dassargues A (2014) Usingmultiple-point Geostatistics for tracer test modeling in a clay-drape environment with spatially variable conductivity and sorption coefficient, Mathematical Geoscience, 46 :519– 537.
[12]. Shakiba S, Doulati Ardejani F (2022) A comparative study of novel object-based geostatistical algorithm and direct sampling method on fracture network modeling, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 1-17, https://doi.org/10.1007/s00477-022-02320-0.
[13]. Guardiano F, Srivastava M (1993) Multivariate geostatistics: Beyond bivariate moments, in Geostatistics Tróia, pp. 133-144, Kluwier Academic, DOI: 10.1007/978-94-011-1739-5_12.
[14]. Strebelle, S., 2002, Conditional simulation of complex geological structures using multiple point statistics, Mathematical Geology, 34, 1: 1-22.
[15]. Zhang T, Switzer P, Journel A (2006) Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation, Mathematical Geology, 38, 1: 63-80.
[16]. Arpat B, Caers J (2007) Conditional simulations with patterns, Mathematical Geology, 39, 2: 177-203.
[17]. Hu L, Chugunova T (2008) Multiple-Point Geostatistics for Modeling Subsurface Heterogeneity: a Comprehensive Review, Water Resource Research, 44, W11413, doi.org/10.1029/2008WR006993.
[18]. Straubhaar J, Walgenwitz A, Renard P, Froidevaux R (2008) Optimization issues in 3D multipoint statistics simulation, paper presented at Geostatistics, 1-5 Dec, Santiago, Chile.
[19]. Somogyvari M, Jalali MR, Parras S J, Bayer P (2017) Synthetic fracture network characterization with transdimensional inversion, Water Resource Research, 35:5104–5123, doi.org/10.1002/2016WR020293.
[20]. Frykmanm P, Srivastava M, Jensen M (2005) Geostatistical simulation of discrete fracture network, In: Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, IAMG, 1: 664–669.
[21]. Masihi M, King P R (2007) A correlated fracture network: modeling and percolation properties, Water Resource Research, 43, 07: 439, https://doi.org/10.1029/2006WR005331.
[22]. Mahmoodpour S, Masihi M (2016) An improved simulated annealing algorithm in fracture network modeling, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 33: 538–550, https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.056.
[23]. Gla¨ser D, Rainer H, Bernd F, Holger C (2017) A discrete fracture model for two-phase flow in fractured porous media. Advances in Water Resources, 110:335–348, doi.org/10.1016/j.advwatres.2017. 10.031.
[24]. Pan D, Li S, Zhenhao X, Yichi Z, Peng L, Haiyan L (2019) A deterministic-stochastic identification and modelling method of discrete fracture networks using laser scanning: Development and case study, Engineering Geology, 262:105310, doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105310.
[25]. Wang X, Jardani A, Jourde H, Lonergan L, Cosgrove J, Gosselin O, Massonnat G (2016) Characterisation of the transmissivity field of a fractured and karstic aquifer, southern France, Advances in Water Resources 87: 106–121, doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.014.
[26]. Mariethoz G, Renard P, Straubhaar J (2010) The Direct Sampling method to perform multiple-point geostatistical simulations, Water Resource Research, 46, 11: 1–14, https://doi.org/10.1029/2008WR007621.
[27]. Canny J (1986) A Computational approach to edge detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-9(1), 170–109, doi:0110010/TPAMI.009112717950.
[28]. Wang X, Jardani A, Jourde H, Lonergan L, Cosgrove J, Gosselin O, Massonnat G (2016) Characterisation of the transmissivity field of a fractured and karstic aquifer, southern France, Advances in Water Resources, 87: 106–121. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.014.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۲-۱۰۸

ریزرخساره‌ها، محیط‌رسوبی و دیاژنز سازند داریان در جنوب‌شرق خلیج‌فارس

میناسادات هاشمی[1]، داود جهانی*[1]، سیدمحسن آل‌علی[1]، علی کدخدایی[2] و بیتا ارباب[3]

۱- دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

۲- دانشکده علوم‌طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

۳- شرکت نفت فلات قاره، اداره پتروفیزیک، شرکت نفت فلات قاره، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

چکیده

سازند داریان (شعیبا) با سن آپتین از مخازن مهم نفتی در حوضه رسوبی زاگرس و خلیج‌فارس به‌شمار می‌رود. این سازند در میدان مورد مطالعه در جنوب‌شرقی خلیج‌فارس به‌عنوان مهم‌ترین سنگ مخزن این میدان بشمار می‌رود. در این مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از مغزه‌های اخذ شده از سازند داریان، مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی ریزرخساره‌های سازند داریان در این میدان منجر به شناسایی ۷ رخساره کربناته و ۱ رخساره ترکیبی کربناته-آواری شد که در ۴ کمربند رخساره‌ای شامل رمپ داخلی، رمپ میانی، رمپ خارجی و حوضه ژرف رسوب کرده‌اند. بررسی فونای موجود در رخساره‌های مورد مطالعه نمایانگر محیط نسبتاً کم‌عمق دریایی (در برخی فواصل نمایانگر محیط دریای ژرف) است. تغییرات یکنواخت رخساره‌ای و نبود رودیست‌ها و مرجان‌ها که موجوداتی ریف‌ساز هستند، و همچنین جایگزینی جلبک لیتوکودیوم با توانایی پایین‌تر تشکیل ریف‌های عظیم، نشانگر محیط رمپ کربناته هموکلینال است که حاوی ریف‌های کومه‌ای است. از فرآیندهای مهم دیاژنزی که کربنات‌های این سازند را تحت تأثیر قرارداده‌اند می‌توان به سیمانی‌شدن، آشفتگی زیستی، پیریتی‌شدن، فسفاتی‌شدن، دولومیتی‌شدن، انحلال، فشردگی مکانیکی و شیمیایی و شکستگی اشاره کرد. تطابق داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه‌ها نشان‌دهنده این است که کیفیت مخزنی سازند داریان در میدان مورد مطالعه متأثر از رخساره‌ها، محیط رسوبی و عوامل دیاژنزی بوده است، به‌نحوی که رخساره‌های لیتوکودیوم‌دار (باندستون و فلوتستون) بیشترین تخلخل و تراوایی را دارا هستند.

کلمات کلیدی: ریزرخساره، دیاژنز، رمپ کربناته، سازند داریان، خلیج فارس.

مقدمه

میدان رشادت در خاور میدان عظیم گازی پارس‌جنوبی و بر روی خط مرزی مشترک ایران و قطر در جنوب‌شرقی خلیج‌فارس قرار دارد. از لحاظ زمین‌شناسی، خلیج‌فارس فرونشست تکتونیکی کم‌عمقی است که در اواخر ترشیری در بخش جنوبی چین‌خوردگی زاگرس تشکیل شده [1]، اما محور و روند اصلی آن در زمان پلیو- پلیستوسن در اثر چین‌خوردگی زاگرس شکل گرفته است.

رخساره و محیط رسوب‌گذاری سازند داریان در میدان مزبور مورد مطالعه قرار گرفت. سازند داریان به سن کرتاسه زیرین (آپتین) معادل سازند شعیبا

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی jahani_davood@yahoo.com
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4943.3204)

و به‌عنوان جوان‌ترین سازند گروه خامی بالایی شناخته می‌شود و از مهم‌ترین سنگ‌های مخزنی زاگرس به شمار می‌رود [۲].

از لحاظ سنگ‌شناسی این سازند عمدتاً آهکی بوده و در یک حاشیه غیرفعال تهنشین شده است [۳]. در محل بُرش نمونه، این سازند شامل ۲۸۶/۵ m سنگ آهک قهوه‌ای- خاکستری ضخیم تا توده‌ای خشن و صخره‌ساز است که به صورت فراوان حاوی روزندار کفزی اربیتولینا است. مرز پایینی آن با سازند گدوان تدریجی ولی مرز بالایی آن با سازند کژدمی به‌شدت فرسایش یافته است [۴] و لایه‌های آلّیتی و گلوکونیتی آن را از سازند کژدمی جدا می‌کند [۵]. سازند داریان در این برش به دو بخش داریان زیرین و بالایی تقسیم می‌شود [۵] که رخساره‌های حوضه‌ای اینتراشلف موسوم به زبانه کژدمی این دو بخش را از هم جدا می‌کند [۶].

با توجه به اهمیت گروه خامی و بخصوص سازند داریان به‌عنوان یکی از مخازن کربناته استراتژیک حوضه زاگرس، این سازند همواره مورد مطالعه زمین شناسان نفتی قرار گرفته است. گروه خامی برای اولین بار به پنج سازند سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان تقسیم شد [۵]. شمیرانی و همکاران لیتواستراتیگرافی و بایواستراتیگرافی سازندهای داریان و کژدمی در جنوب‌غرب ایران را مورد مطالعه قرار دادند [۷]. ویژگی‌های مخزنی و محیط رسوبی سازند داریان (از تنگه هرمز تا پایانه شمال‌باختری خلیج‌فارس) مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. لاسمی و سیاهی بازسازی محیط رسوبی سازند داریان و چینه‌نگاری سکانسی آن در بخش جنوبی فروافتادگی دزفول را انجام دادند [۹]. مقایسه ریزرخساره‌های سازند داریان در برش سطحی تاقدیس کوه آنه و چاه چلینگر ۳ انجام گرفت [۱۰]. آدابی و عباسی تاریخچه دیاژنزی سازند داریان را برپایه مطالعات سنگ‌چینه‌نگاری و ژئوشیمیایی، در برش سطحی کوه سیاه واقع در شمال خاور شیراز و چاه شماره ۱ سبزپوشان مطالعه کردند [۱۱]. امیری و همکاران در مطالعه‌ای محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی سازند داریان در میدان پارس‌جنوبی را مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. سعدی‌راد و همکاران تاریخچه رسوب‌گذاری و پس از رسوب‌گذاری سازند داریان را در میدان نفتی آزادگان مطالعه نمودند [۱۳]. امیری، محیط رسوب‌گذاری سازند داریان در میدان پارس‌جنوبی را از نوع رمپ توصیف کرده است که با توجه به غالب بودن رخساره‌های گل‌پشتیبان در منطقه‌ی مورد مطالعه، آن را به یال پشت به باد حوضه‌ی اینتراشلفی نسبت داده است، که فاقد رخساره‌های ریفی قابل ملاحظه است [۱۴]. موسوی‌زاده سازند داریان را در ۶ برش سطح‌الارضی در فارس داخلی مورد ارزیابی قرار داد که در نتیجه محیط رسوب‌گذاری را به صورت یک رمپ کم شیب که به حوضه‌ی اینتراشلفی منتهی می‌شود، در نظر گرفته است [۱۵]. مهرابی و همکاران و نیز بهره‌ور و همکاران به مطالعه چینه‌نگاری سکانسی سازند داریان پرداخته و در این مطالعات سه سکانس رسوبی رده ۳ را در برخی از میادین خلیج‌فارس مشخص نمودند [۱۶ و ۱۷].

در مطالعه پیش‌رو به بررسی ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی و همچنین ارائه‌ی مدل رسوبی این سازند براساس اطلاعات بدست آمده از مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از مغزه در یکی از چاه‌های میدان رشادت در جنوب‌شرقی خلیج‌فارس پرداخته شده است.

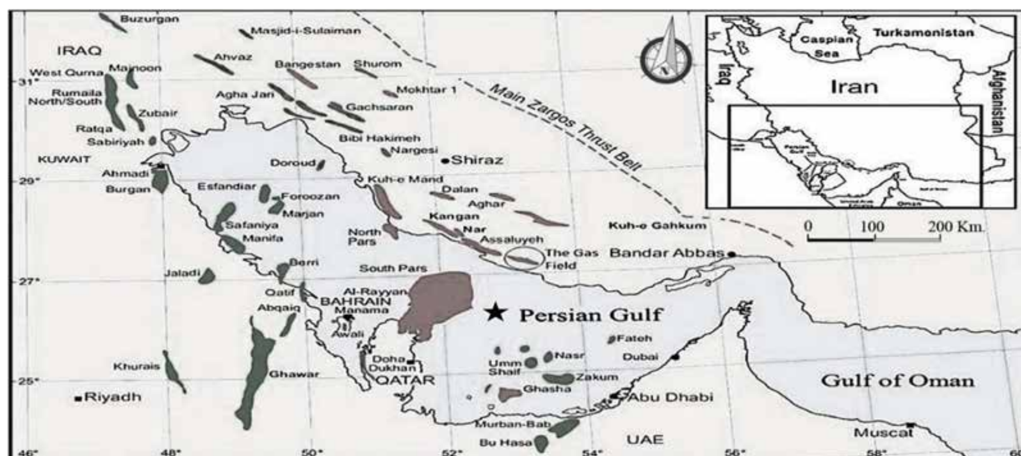
زمین‌شناسی، چینه‌شناسی و موقعیت منطقه

حوضه خلیج‌فارس به‌عنوان یکی از غنی‌ترین حوضه‌های هیدروکربوری جهان است که در خاورمیانه قرار دارد. این حوضه توسط میادین عظیم نفت و گاز حوضه رسوبی زاگرس ایران، قطر و کویت و میادین بسیار بزرگ کشورهای عربی (عربستان، امارات متحده عربی، قطر و بحرین) در حاشیه جنوب

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۲-۱۰۸

و جنوب‌غربی خلیج‌فارس احاطه شده است. میدان مورد مطالعه در بخش جنوب‌شرق خلیج فارس نزدیک خط مرزی قطر و در حدود ۱۰۰-۱۵۰ کیلومتری جنوب جنوب غربی جزیره لاوان و ۱۳۰ کیلومتری جنوب‌غربی جزیره کیش انتخاب شده است (شکل ۱).

دیاپیرهای نمکی نقش مهمی در تشکیل تله ها و ساختارها در این میدان دارند [۱۹]. سنگ مخزن‌های اصلی این میدان سازندهای سروک بالایی، داریان (شعیبا) و سورمه (عرب زون) می باشد. سازند شعیبا به سن آپتین از مهمترین مخازن نفتی در جنوب شرقی خلیج فارس مخصوصاً در امارات متحده عربی به‌شمار می‌رود [۲۰]. این سازند بوسیله مارن‌ها و سنگ‌های آواری سازند نهرعمر[۲] (معادل سازند کژدمی) پوشیده شده و بر روی کربنات‌های سازند خریب[۱] واقع شده است. تپه‌های جلبکی و رخساره‌های رودیستی پربارترین زون‌های آن هستند، در حالی‌که کربنات‌های کارستی شده در بالاترین بخش سازند، میان‌لایه نفت‌دار مهم دیگر در سازند داریان (شعیبا) است [۲۱]. در ایران معادل سازند شعیبا تحت‌عنوان سازند داریان (کربنات‌های غنی از اوربیتولینا به سن آپتین) شناخته شده است. این سازند در گستره وسیعی از حوضه زاگرس (به استثنای استان لرستان) و خلیج‌فارس گسترش یافته است. ون‌بوخم و همکاران اخیراً ساختار چینه‌شناسی و سکانس‌های رسوبی سازند داریان در منطقه زاگرس را مطالعه کرده‌اند [۲]. براساس کار آن‌ها، در طی آپتین، دو حوضه اینتراشلف کژدمی و باب، در فروافتادگی دزفول و خلیج‌فارس شرقی وجود داشتند (شکل ۲). بنظر می‌رسد این حوضه‌ها یا فروافتادگی‌ها در نتیجه فرونشست دیفرانسیلی که توسط فعالیت‌های گسل‌ها کنترل شده، شکل گرفته‌اند [۲ و ۲۲]. در حوضه‌های اینتراشلف شاهد نهشته‌شدن کربنات‌های همی‌پلاژیک بوده‌ایم و به‌سمت حاشیه‌ی حوضه، این رخساره‌های عمیق به‌تدریج به سنگ آهک‌های کم‌عمق و اوربیتولینادار تبدیل می‌شوند. در حاشیه حوضه باب ساختارهای رودیستی گسترش یافته و میان لایه‌های مخزنی خوبی در سازند شعیبا فراهم کرده است. به‌نظر می‌رسد که این کربنات‌ها در معرض رخنمون و دیاژنز حاصل از یک پایین افتادن جزئی سطح آب دریا در آپتین دیرین قرار گرفته‌اند، بنابراین ویژگی‌های مخزنی این سازند در طی شستشوی آب جوی و انحلال افزایش یافته است [۲۴]. میزان بسیار زیادی از ریزتخلخل‌ها در بالای سازند مورد نظر گسترش یافته است، در صورتی‌که شاید مشاهدات مغزه و دیتای ژئوشیمیایی، ویژگی‌های کارستی‌شدن و رخساره‌های گل‌پشتیبان این بخش از سازند را نشان ندهند [۲۵ و ۲۶].



شکل ۱ موقعیت میدان مورد مطالعه در جنوب شرقی خلیج فارس که با علامت ★ مشخص شده است [۱۸].

1. Nahr Umr Formation
2. Kharaib

Epoch/Era			Offshore Kuwait and Iraq	Offshore Saudi Arabia & Bahrain	Offshore Qatar and UAE	Offshore Iran
CRETACEOUS	Upper	Maastrichtian	Tayarat	Aruma	Simsima	Gurpi
		Campanian	Bahra		Fiqa	
		Santonian	Gudair		Halul	Ilam (BANGESTAN GROUP)
		Coniacian			Laffan	
	Middle	Turonian	Magwa	Mishrif Mbr, Rumaila Mbr (WASIA GROUP)	Mishrif	Sarvak
		Cenomanian	Ahmadi, Wara	Ahmadi Mbr, Wara Mbr	Shilaif (Khatiyah)	
		Albian	Mauddud, Burgan	Mauddud Mbr, Safaniya Mbr, Khafji Mbr	Mauddud, Nahr Umr	Kazhdumi
	Lower	Aptian	Shu'aiba	Shu'aiba (THAMAMA GROUP)	Bab Mbr, Shu'aiba	Dariyan
		Barremian	Zubair	Biyadh	Kharaib	Gadvan
		Hauterivian	Ratawi	Buwaib	Lekhwair, Zakum Mbr	
		Valanginian		Yamama	Habshan	Fahliyan
		Berriasian	Minagish	Sulaiy		

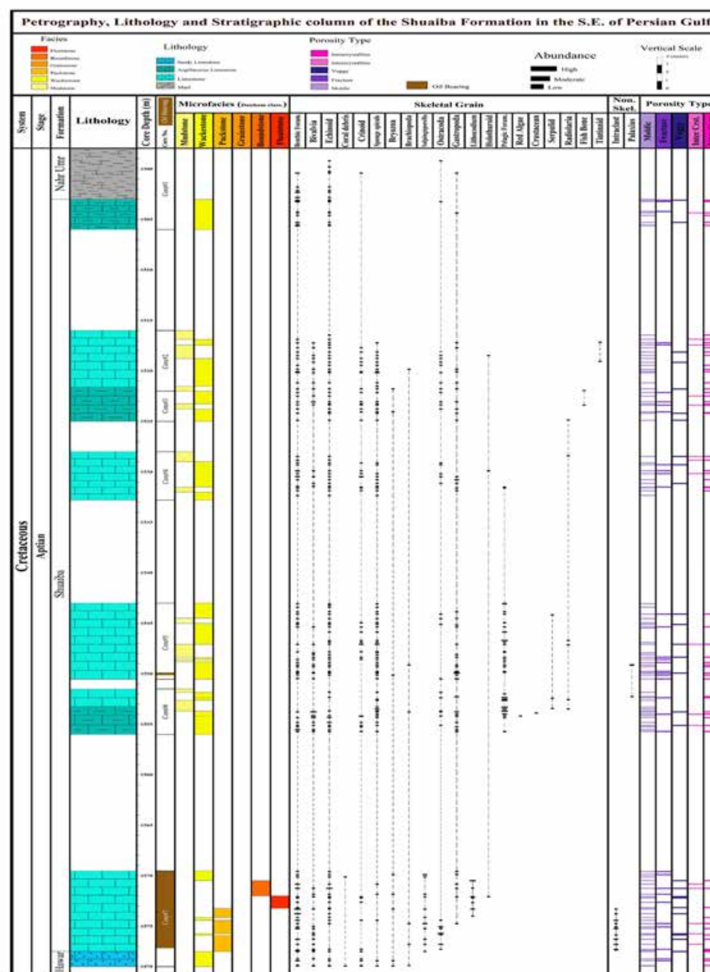
شکل ۲ چینه‌شناسی و تعیین مرز بالایی و زیرین سازند داریان در خلیج فارس و کشورهای عربی [۲۳].

برخلاف چینه‌شناسی سازند شعیبا، دیاژنز و پتانسیل مخزنی سازند داریان به‌خوبی در حوضه خلیج‌فارس ایران مطالعه و ثبت نشده است. سازند کربناته داریان اخیراً در بسیاری از میادین جنوب‌شرق خلیج‌فارس تولیدکننده نفت است. بعلاوه، چندین میدان خشکی ایران (دزفول جنوبی) از سازند داریان نفت تولید می‌کنند. در میدان مورد مطالعه بیشتر بخش‌های سازند داریان مغزه‌گیری و مطالعه شده تا محیط‌های قدیمه رسوبی، تاریخچه دیاژنز و ویژگی‌های مخزنی آن بازسازی گردد. در مطالعه پیش‌رو، رخساره‌ها، دیاژنز و محیط رسوبی سازند داریان که اینتروال اصلی مخزنی در میدان نفتی مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ ستون چینه‌شناسی و پتروگرافی سازند داریان دیده می‌شود. برای تحلیل ریزرخساره‌ها و تعیین خصوصیات بافت سنگ از داده‌های یک حلقه چاه واقع در جنوب‌شرق خلیج‌فارس استفاده می‌شود. انتخاب چاه براساس وجود گزارشات زمین‌شناسی، مقاطع نازک، نتایج آنالیز مغزه معمولی و ویژه و نمودارهای پتروفیزیکی انجام شده است. در توصیف ریزرخساره‌ها و فابریک سنگ از حدود ۱۵۰ مقطع نازک میکروسکوپی رنگ‌آمیزی شده با آلیزارین قرمز و اپوکسی آبی و نتایج آنالیز مغزه معمولی و ویژه استفاده شده است. نامگذاری ریزرخساره‌ها براساس طبقه بندی دانهام [۲۷] و امبری و کلوان [۲۸] است.

مواد و روش ها

برای تعیین انواع ریزرخساره‌ها در سازند داریان حدود ۱۵۰ عدد مقطع نازک میکروسکوپی، اخذ شده از مغزه‌های موجود مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به تنوع رخساره‌ای، انواع آلوکم، خرده‌های اسکلتی و غیراسکلتی، بافت‌ها و ساخت‌های موجود، محتوای فسیلی و فابریک‌های موجود تعیین گردید. نام‌گذاری [۲۷ و ۲۸] با توجه به اهمیت بافتی رخساره‌ها و نوع مواد متصل کننده ذرات برای نام‌گذاری رخساره‌ها انتخاب گردید. طبقه‌بندی ویلسون [۲۹] نیز در محل‌یابی محیط رخساره‌ای انتخاب شد. تغییرات آرام و تدریجی رخساره‌ها و نبود سدهای ریفی، نمایانگر مدل محیط رسوبی پلتفرم رمپ کربناته از نوع هموکلینال[1] (HR) برای نهشته‌های مورد مطالعه سازند داریان است. ریز رخساره‌ها در بخش رمپ داخلی، میانی، بیرونی و حوضه ژرف تشخیص داده شده است.

1. Homoclinal Ramp



شکل ۳ ستون چینه‌شناسی و پتروگرافی سازند داریان در برش مورد مطالعه

نتایج و بحث

اجزای تشکیل دهنده ریزرخساره‌ها

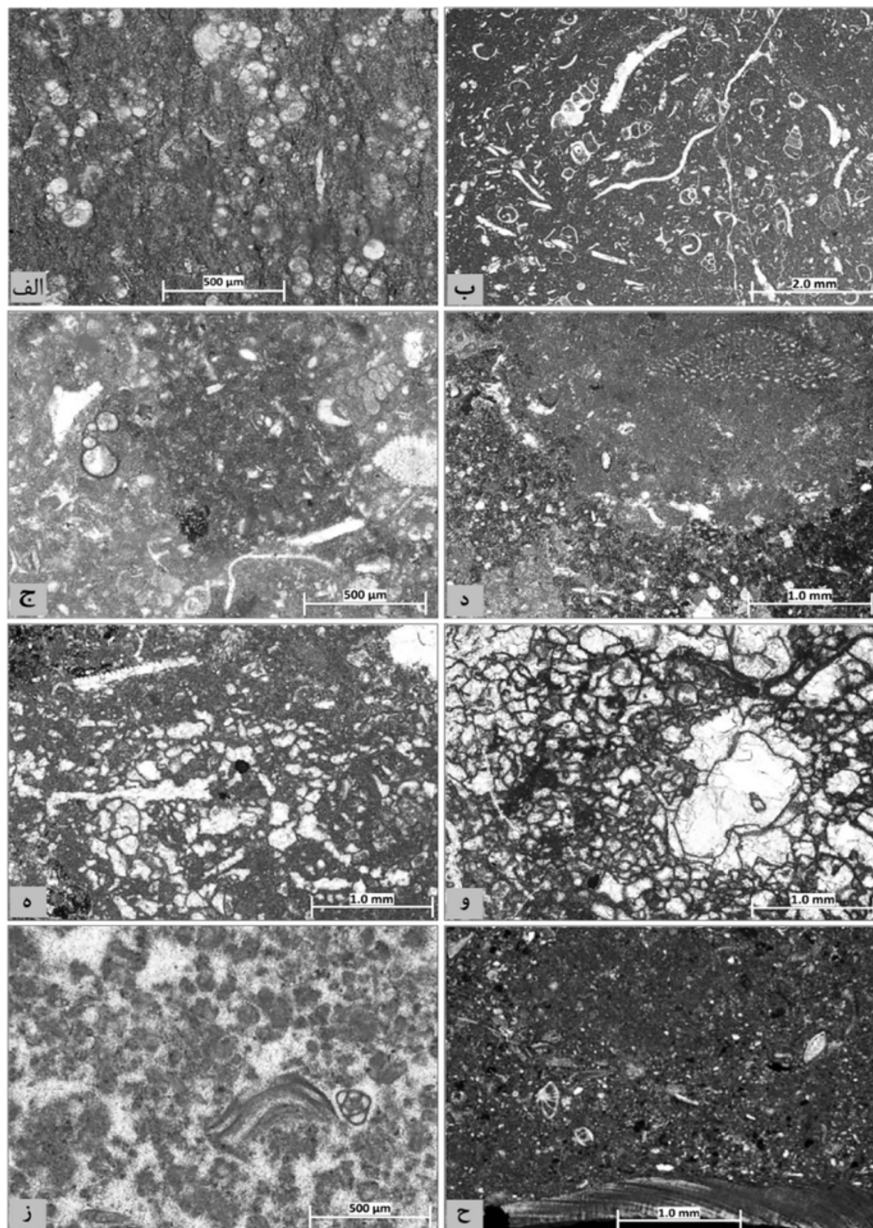
نهشته‌های سازند داریان در چاه مورد مطالعه، متشکل از میکرایت به عنوان زمینه سنگ و دانه‌های اسکلتی مانند قطعات مختلف پوسته بی‌مهرگان مانند خارداران، لاله‌وشان پلاژیک، ساقه لاله‌وشان، اسکلریت خیاران دریایی، دوکفه‌ای‌ها، شکم‌پایان، بازوپایان، سوزن اسفنج‌ها، مرجان‌های اسکلراکتینا، بریوزوئرها، کرم‌های حلقوی، سخت‌پوستان مانند استراکودها و خرچنگ، روزن‌داران پلانکتونیک و بنتونیک، رادیولرها و قطعات استخوانی ماهی و دانه‌های غیراسکلتی مانند اینتراکلست و پلت دفعی خرچنگ‌ها به نام پالاکسیوس[1] است که برای تقسیم‌بندی رخساره‌های مختلف سازند داریان از درصد فراوانی آنها استفاده می‌گردد. روزنداران کفزی (بخصوص اربیتولینیدها، میلیولیدها، سیکلامینیدها، اپیستومینا و فرم‌های ردیفی)، جلبک‌های سبز (بخصوص لیتوکودیوم و سالپینگوپورلا)، خارپوستان و نرم‌تنان بیشترین درصد ذرات اسکلتی را در بین اجزای سازنده ریزرخساره‌ها به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به وجود اجزای فوق و درصد حضور آنها، هشت ریزرخساره در سازند داریان تشخیص داده شد.

میکروفاسیس شماره 1 (MF-1): فرامینیفر پلاژیک وکستون/ مادستون

این رخساره با بافت گل‌پشتیبان شامل روزنداران پلانکتونیک نظیر Hedbergella luterbacheri، Hedbergella excelsa، Hedbergella praetrochoidea، Hedbergella sp.، Globigerinelloides sp، تعداد بسیار کمی از روزنداران کفزی مانند

1. Palaxius Minaensis

Choffatella decipiens، Marssonella trochus و Siphovalvulina sp. و برخی عناصر اسکلتی بی‌مهرگان نظیر قطعات و خار خارداران، سوزن اسفنج‌ها و قطعات لاله‌وشان پلاژیک از خانواده کوماتولیدها و همچنین استراکودها می‌باشد. فراوانی این فونا معمولا کمتر از ۱۵٪ بوده و درون میکرایت رسی پراکنده هستند. این رخساره بیشتر سنگ آهک رسی است. بلورهای دولومیت وکانی پیریت نیز در آن به‌وفور دیده می‌شود. در این رخساره انحلال فشاری معمول بوده و با توجه به بافت گل‌پشتیبان، طبیعت آرژیلیکی و ساختار لامیناسیون، این رخساره در شرایط کم‌انرژی نهشته شده است. تسلط فونای پلاژیک و کمبود فرم‌های کفزی، کمربند رخساره‌ای محیط حوضه‌ی ژرف را پیشنهاد می‌کند [۲۹ و ۳۰] (شکل ۴- (الف)).



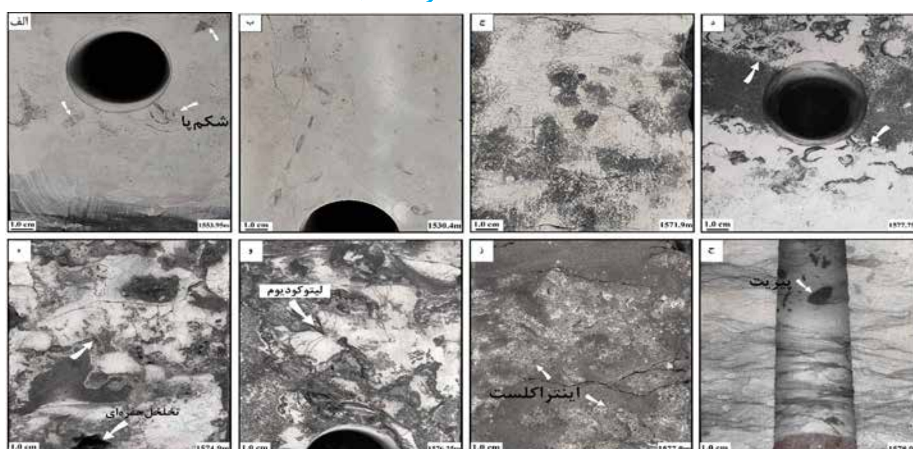
شکل ۴ ریزرخساره‌های مورد مطالعه در سازند داریان، میدان رشادت. الف) فرامینیفر پلاژیک وکستون، عمق ۱۵۴۳/۱۸ m، ب) گاستروپود پلاژیک وکستون، عمق ۱۵۴۹/۹۶ m، ج) بایوکلاست وکستون/مادستون، عمق ۱۵۵۵/۶۸ m، د) بایوکلاست اربیتولینا وکستون/ مادستون، عمق ۱۵۷۴/۳۷ m، ه) فرامینیفر لیتوکودیوم فلوتستون، عمق ۱۵۷۲/۰۵ m، و) لیتوکودیوم باندستون، عمق ۱۵۷۳/۲۴ m، ز) اینتراکلست فرامینیفر وکستون/ پکستون، عمق ۱۵۶۹/۶۴ m و ح) بایوکلاست پکستون/وکستون حاوی دانه‌های ماسه، عمق ۱۵۷۵/۲۴ m.

میکروفاسیس شماره 2 (MF-2): گاستروپود پلاژیک وکستون

این رخساره دارای بافت گل‌پشتیبان (وکستون) با فونای غالب گاستروپود یا شکم‌پایانِ پلاژیک است. همچنین، روزنداران پلاژیک مانند .Hedbergella sp و Hedbergella sigali در این رخساره دیده می‌شوند. به‌علاوه از سایر بایوکلاست‌های مرتبط با این رخساره می‌توان به قطعات و خارِ خارداران، سوزن اسفنج‌ها و برخی از روزنداران کفزی مانند جنس اپیستومینا[1] و خانواده تکستولارید اشاره نمود. فراوانی آلوکم‌ها در بیشتر نمونه‌ها کمتر از ۴۰٪ است. لیتولوژی در محدوده سنگ‌آهک تا سنگ‌آهک رسی است. آشفتگی زیستی معمولاً در این رخساره‌ها با شدت‌های مختلف وجود دارد. انحلال، سیمان شدگی، فشردگی و شکستگی (پرشده با سیمان کلسیتی) ویژگی‌های دیاژنزی معمول این رخساره است. بیشتر بایوکلاست‌ها کلسیتی یا حل شده‌اند و یا با سیمان کلسیتی اسپاری پر شده‌اند. بر اساس بافت گل‌پشتیبان به همراه حضور گاستروپودهای پلاژیک و فونای دریای باز و کمبود شاخص‌های دریای کم‌عمق، نمایانگر نهشته شدن این رخساره در محیط دریای عمیق و آرام است [۲۹ و ۳۰]. رخساره‌های مرتبط شرایط رسوبی نسبتاً عمیق نزدیک به حوضه را نشان می‌دهند و در محیط رمپ بیرونی نهشته شده‌اند (شکل‌های ۴- (ب) و ۵- (الف)).

میکروفاسیس شماره 3 (MF-3): بایوکلاست وکستون/ مادستون

اجزا اصلی این رخساره شامل دانه‌های بایوکلاست بزرگ و ریز با فراوانی کمتر از ۲۵٪ است. بایو کلاست‌ها اکثراً در ماتریکس میکرایتی شناور هستند. عمده بایوکلاست‌های این رخساره شامل قطعات خارپوستان، شکم‌پایان، بازوپایان، خار خارداران و سوزن اسفنج‌ها است. مقدار کمی از رادیولرها، روزنداران پلاژیک مانند هدبرگلا[2] و بنتیک نیز از تشکیل دهنده‌های جانبی آنها هستند. رخساره‌های گل‌پشتیبان بایوکلاستی، شامل روزنداران پلاژیک و سوزن‌های اسفنج در محیط‌های دریایی عمیق و آرام معمول هستند [۲۹ و ۳۰]. پیدایش فونای دریای باز همراه با آشفتگی زیستی و رس‌های آرژیلیتی (نبود فونای دریای کم‌عمق و محصور) همگی این تفسیر را تأیید می‌کنند. همچنین بر اساس کمربندهای رخساره‌ای، این رخساره‌ها به محیط نهشته شده دررمپ بیرونی تفسیر می‌شود (شکل‌های ۴- (ج) و ۵- (ب)).



شکل ۵ تصاویر مغزه از ریزرخساره‌های مورد مطالعه در سازند داریان. الف) ریزرخساره گاستروپود پلاژیک وکستون، عمق m ۱۵۵۳/۹۵، قطعات گاستروپود با فلش مشخص است، ب) ریزرخساره بایوکلاست وکستون/مادستون، عمق m ۱۵۳۰/۴۰، ج) ریزرخساره بایوکلاست اربیتولینا وکستون/مادستون، عمق m ۱۵۷۱/۹۰، د) رخساره فرامینیفر لیتوکودیوم فلوتستون، عمق m ۱۵۷۷/۵۵، ه) ریزرخساره لیتوکودیوم باندستون، عمق m ۱۵۷۴/۹۰، و) ریزرخساره لیتوکودیوم باندستون، عمق m ۱۵۷۶/۲۵، ز) ریزرخساره اینتراکلست فرامینیفر وکستون/پکستون، عمق m ۱۵۷۷/۶۰، و ح) ریزرخساره بایوکلاست پکستون/وکستون حاوی دانه‌های ماسه، عمق m ۱۵۷۸/۹۰.

1. Epistommina
2. Hedbergella

میکروفاسیس شماره 4 (MF-4): بایوکلاست اوربیتولینا وکستون/ مادستون

این رخساره ترکیبی از بایوکلاست‌ها و اوربیتولیناها در یک ماتریکس میکرایتی است. عمده بایوکلاست‌های موجود در این رخساره شامل قطعات خارداران، خارِ خارداران، شکم‌پایان، دوکفه‌ای‌ها و استراکودها است. گونه‌های مختلف و متنوع اوربیتولینیدها مانند *Palorbitolina lenticularis*، *Mesorbitolina sp.*، *Orbitolina sp* و *Dictyoconus sp.* مشاهده می‌شود. بقایای جلبک‌های سبز مانند *Lithocodium aggregatum* و *Salpingoporella dinarica* نیز در این رخساره دیده می‌شود. اوربیتولیناها در بافت‌های وکستونتا مادستون دیده می‌شوند. در بیشتر موارد لیتولوژی سنگ آهک است که شامل مقادیر مختلفی از رس است. پیریتی شدن، انحلال، سیمانی‌شدن و فشردگی از فرآیندهای دیاژنزی اصلی این رخساره است. با توجه به محتوای موجودات (فونای متنوع دریای باز)، ویژگی‌های رسوب‌شناسی (بافت گل‌پشتیبان)، این رخساره‌ها در محیط رمپ میانی با شوری نرمال و سطح انرژی متوسط نهشته شده‌اند [۲۹ و ۳۰] (شکل‌های ۴- (د) و ۵- (ج)).

میکروفاسیس شماره 5 (MF-5): فرامینیفر- لیتوکودیوم فلوتستون

قطعات بزرگ جلبک لیتوکودیوم و مرجان‌های استروماتوپورید، مشخص‌ترین اعضای این رخساره هستند. سایر بایوکلاست های موجود شامل قطعات جلبک و روزنداران کفزی بزرگی مانند *Praechrysalidina infracretacea* و *Pseudocyclammina greigi* است و لیتولوژی شامل سنگ آهک و محدوده‌ی بافت بین فلوتستون و وکستون است. در این رخساره آشفتگی زیستی بندرت دیده می‌شود. سیمانی‌شدن، فشردگی و شکستگی (پرشده با کلسیت) فرآیندهای قابل توجه دیاژنز هستند. بافت فلوتستون (روزنداران بزرگ و همزیست با لیتوکودیوم) حضور ریف‌های کومه‌ای کوچک و تپه‌های جلبکی را در پلتفرم کربناته سازند داریان پیشنهاد می‌کند. ارتباط لیتوکودیوم و روزنداران بزرگ، محیط کم‌عمق و نوردار رمپ داخلی (لاگون باز تا دریای باز) را نشان می‌دهد (شکل‌های ۴-(ه)، ۵-(د)).

میکروفاسیس شماره 6 (MF-6): لیتوکودیوم باندستون

این رخساره شامل باندستون جلبک لیتوکودیوم است. مقدار بسیار کمی از روزنداران مانند خانواده *Orbitolinid*، *Miliolid* و برخی فرم‌های دوردیفی مانند *Novalesia* و همچنین استراکود در این رخساره دیده می‌شود. پلت‌های دفعی بخصوص پالاکسیوس به عنوان اجزا به تله افتاده در لایه بندی‌های ظریف ساختار اسکلتی لیتوکودیوم دیده می‌شوند. این رخساره دارای ساختارهای بزرگ حفره‌ای و غاری شکل در مغزه‌ها است و لیتولوژی آن سنگ آهک می‌باشد. سیمانی‌شدن مهم‌ترین ویژگی دیاژنزی این رخساره است. باندستون‌های لیتوکودیوم یکی از بخش‌های اصلی مخزنی را در این سازند تشکیل می‌دهند. این رخساره متعلق به محیط با نرخ انباشت کم، شفاف، اکسیژن‌دار، کم‌عمق و کم انرژی مانند محیط لاگون می‌باشد (شکل‌های ۴- (و) ، ۵- (ه) و ۵- (و)).

میکروفاسیس شماره 7 (MF-7): اینتراکلست فرامینیفر وکستون/ پکستون

اینتراکلست و روزنداران اجزا اصلی این رخساره هستند و دارای بافت وکستون پکستون هستند. به نظر می‌رسد که بیشتر دانه‌های اینتراکلست از تپه‌های جلبکی که به‌طور گسترده میکرایتی شده‌اند، آورده شده‌اند. از روزنداران کفزی عمدتاً با پوسته پورسلانوز این رخساره می‌توان به میلیولیدها (*Rumanoloculina*، *Istriloculina elliptica*، *Moesiloculina histiri*)، *Nezzazata ellitzae*، و *ponticuli*، *Mayncina bulgarica*، *Glomospira sp.* و اربیتولینیدها اشاره نمود. همچنین، استراکود و قطعات دوکفه‌ای و بازوپا نیز در این رخساره مشاهده می‌شود. ویژگی‌های دیاژنزی این رخساره نئومورفیسم، سیمانی شدن، فشردگی و شکستگی (پر شده با

کلسیت) است. براساس مجموعه فونا، ارتباط رخساره‌ها و ویژگی‌های دیاژنزی (میکریتی شدن و نئومورفیسم) این رخساره به نظر می‌رسد که در محیط کم عمق لاگون نهشته شده است (شکل‌های ۴- (ز) و ۵- (ز)).

میکروفاسیس شماره 8 (MF-8): رخساره ترکیبی بایوکلاست پکستون/وکستون حاوی دانه‌های تخریبی

این رخساره با زمینه میکرایتی وکستون تا پکستونی حاوی قطعات خارپوستان، قطعات جلبک سبز سالپینگوپورلا، دوکفه‌ای و روزنداران کفزی مانند *Epistommina*، *Choffatella*، *Orbitolina*، *Lenticulina*، *Nodosariid*، و ذرات تخریبی ریز تا متوسط دانه نیمه‌مدور تا نیمه‌زاویه‌دار در حد سیلت و ماسه است. این ذرات تخریبی عمدتاً کوارتز بوده که بطور میانگین حدود ۵ تا ۱۰٪ ذرات موجود در این رخساره را تشکیل می‌دهند (در برخی اینترووال‌ها درصد ذرات تخریبی به بیش از ۲۰٪ هم می‌رسد). سنگ‌شناسی این رخساره آهک ماسه‌ای است و رگچه‌های انحلالی حاوی هیدروکربن در این رخساره بوفور دیده می‌شوند. این رخساره بر روی رخساره شماره هفت یعنی اینتراکلست فرامینیفر وکستون/پکستون و در پایین‌ترین بخش سازند داریان قرار گرفته است. با توجه به زمینه میکرایتی و درصد پایین تخلخل، از نظر مخزنی رخساره مناسبی نیست. در این رخساره تخلخل‌های شکستگی و قالبی و حفره‌ای دیده می‌شود. پیریتی‌شدن پدیده غالب دیاژنتیکی در این رخساره است. این رخساره متعلق به محیط‌های با انرژی متوسط و دریای باز بوده و معادل رخساره SMF-4 فلوگل [۳۰] است و در کانال‌های زیردریایی محیط‌های کم‌عمق تا نسبتاً عمیق لاگون تا رمپ میانی نهشته می‌گردد (شکل‌های ۴- (ح) و ۵- (ح)).

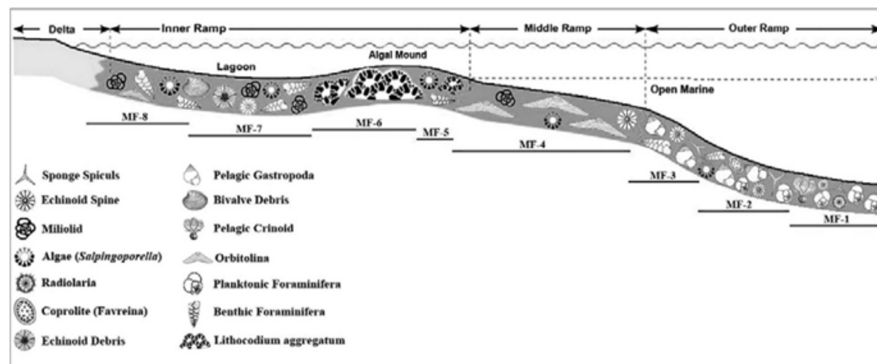
محیط و مدل رسوبی

براساس ریزرخساره‌های شناسایی شده و پراکندگی آن‌ها، عدم وجود سدهای ریفی به‌هم پیوسته، نبود رسوبات ریزشی و لغزشی و تغییر تدریجی رخساره‌ها نسبت به یکدیگر، سازند داریان در میدان نفتی مورد مطالعه در یک رمپ کربناته هموکلینال یا هم‌شیب نهشته شده است. مطالعات قبلی بر روی محیط رسوبی سازند داریان در مناطق مجاور چاه مورد مطالعه نیز مؤید نهشته‌شدن این سازند در محیط رمپ کربناته است [۱۲، ۱۶ و ۱۷]. رمپ به‌صورت کلی یک پلتفرم کربناته با شیب کم است که چون تغییرات عمق در آن‌ها خیلی آرام و تدریجی است پس تبدیل ریز رخساره‌ها نیز در آن ها خیلی به‌کندی صورت می‌گیرد. در رمپ کربناته به دلیل عدم حضور سدهای مهم و پیوسته پرانرژی‌ترین محیط در نزدیکی خط ساحلی است. رمپ کربناته دارای سه بخش شامل رمپ داخلی (بالای سطح استهلاک امواج)، رمپ میانی (بین موجسار طوفانی و سطح استهلاک امواج) و رمپ بیرونی (زیر موجسار طوفانی) است. در شکل ۶ محیط رسوبی ریز رخساره‌های سازند داریان در چاه مطالعه شده مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تعلق هشت رخساره مطالعه شده به محیط‌های رمپ داخلی، میانی، بیرونی و حوضه ژرف است و نمایانگر محیط از نوع رمپ هموکلینال (HR) است.

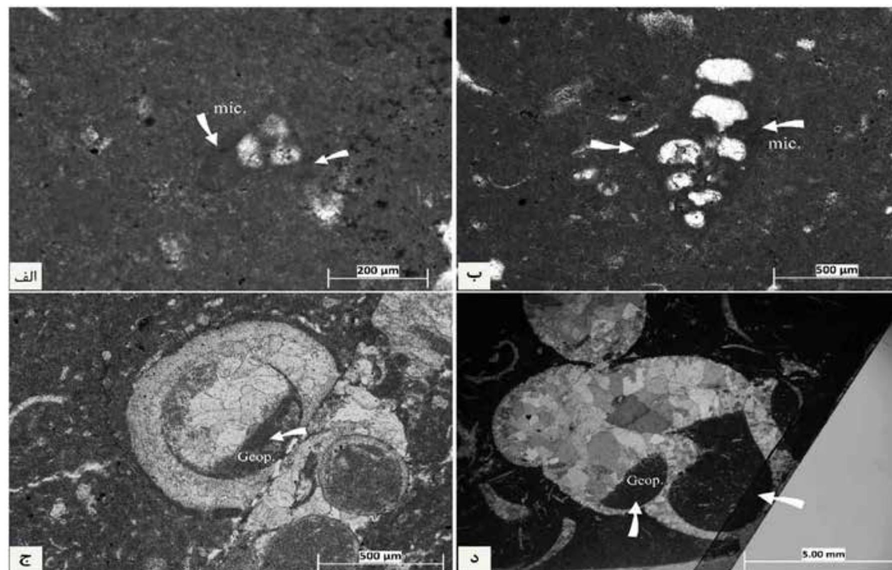
فرآیندهای دیاژنزی در کربنات‌های سازند داریان در چاه مورد مطالعه

میکرایتی شدن

فرآیندی است که در آن آلوکم‌ها توسط موجوداتی مانند قارچ‌ها، باکتری‌ها و یا جلبک‌ها دگرسان می‌شوند. به این ترتیب حاشیه و پوسته آن‌ها سوراخ شده و حفرات با میکرایت پرشده و پوششی میکرایتی ایجاد می‌کنند و حاشیه پوسته و یا تمام اجزای مختلف آلوکم توسط میکرایت جایگزین می‌گردد. میکرایتی شدن بیشتر در زون فریاتیک دریایی، در فصل مشترک رسوب و آب، و در آب های دریایی و آرام رخ می‌دهد [۳۱].



شکل ۶ مدل رسوبی رمپ هموکلینال بر اساس مطالعات آزمایشگاهی و مطابق با نوع ریزرخساره‌ها، سازند داریان در چاه مورد مطالعه.



شکل ۷ فرآیند میکرایتی شدن و تبلور مجدد و تشکیل ژئوپتال، سازند داریان. الف و ب) تشکیل ساختار ژئوپتال در حجره شکم‌پا، بترتیب عمق‌های ۱۵۳۱/۴۲ و ۱۵۵۲/۳۰ m، ج) میکرایتی‌شدن در اطراف پوسته روزندار کفزی *Verneuilina*، عمق ۱۵۲۰/۰۸ m، عمق ۱۵۳۱/۴۲ m و د) میکرایتی‌شدن در اطراف پوسته روزندار کفزی *Praechrysalidina*، عمق ۱۵۲۰/۰۸ m.

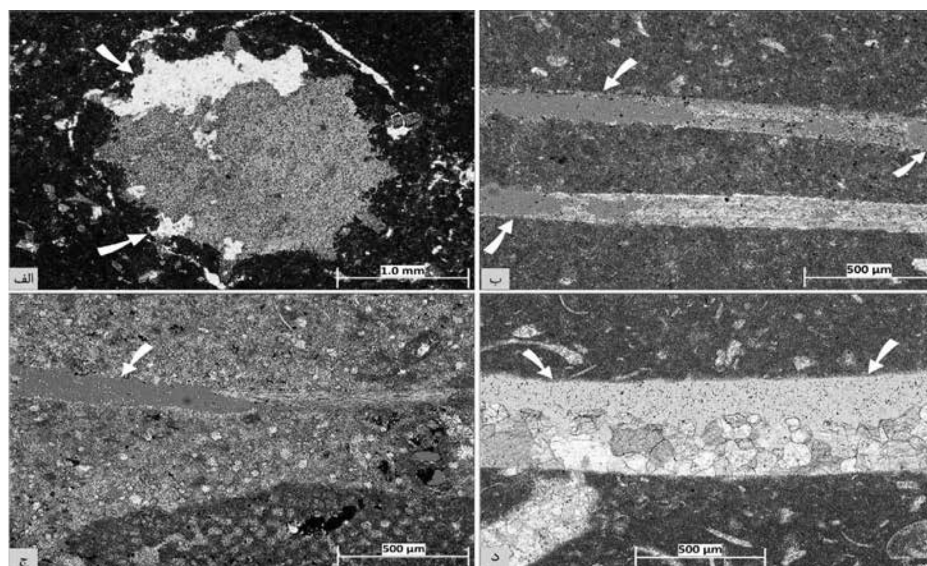
میکرایتی‌شدن ذرات می‌توانند باعث مسدود کردن منافذ و گذرگاه‌ها شده و یا مانع از انحلال آن‌ها در مراحل بعدی دیاژنز شده و سبب کاهش تخلخل و کیفیت مخزنی گردد. البته این فرآیند شاید بتواند با کاهش تأثیر فرآیندهای دیاژنز تدفینی باعث افزایش کیفیت مخزنی گردد [۳۲]. در برش مورد مطالعه، روزنداران کفزی و به صورت بسیار اندک برخی از خرده‌های اسکلتی بی‌مهرگان تحت تأثیر این فرآیند قرار گرفته است. در شکل‌های ۷- (ج و د) فرآیند میکرایتی شدن در پوسته روزنداران کفزی *Verneuilina* و *Praechrysalidina* مشاهده می‌شود.

تبلور مجدد

فرآیند جایگزینی برجای یک کانی توسط یک ترکیب مشابه، تبلور مجدد نام دارد. در سنگ‌های کربناته تغییر بافت و ترکیب کلسیت، دولومیت و حتی آراگونیت و همچنین تشکیل ساختارهای ژئوپتالی از موارد مهم فرآیند تبلور مجدد محسوب می‌شوند. در چاه مورد مطالعه شاهد تشکیل ساختارهای ژئوپتال بخصوص در شکم‌پایان هستیم (شکل‌های ۷- (الف و ب). تبلور مجدد بطور معمول در رخساره‌های کم‌انرژی و گل‌پشتیبان رخ می‌دهد که می‌تواند به علت تأثیر فرایند دیاژنز جوی فریاتیک باشد [۳۳].

انحلال

انحلال یکی از پدیده‌های دیاژنزی تخریبی است که به‌عنوان فرآیند اصلی افزاینده تخلخل و بهبود دهنده کیفیت مخزن در نهشته های سازند داریان عمل نموده است و در نتیجهٔ آن کانی‌های کربناته حل و جابجا می‌شوند و ممکن است فضای ایجاد شده توسط کانی‌های دیگر پر شود. بنابراین انحلال موجب ایجاد یا تغییر در فابریک فضاهای خالی سنگ رسوبی می‌شود. انحلال ممکن است به صورت انتخابی توسط بافت[1] باشد و فضاهای خالی قالبی را ایجاد کند که معمولاً حفرات غیر مرتبط با هم را می‌سازند و یا به صورت انتخابی توسط بافت نباشد و حفرات مرتبط در سنگ ایجاد و گسترش دهد. اغلب رخساره‌ها مورد مطالعه به غیر از وکستون با رخساره پلاژیک تحت تأثیر انحلال واقع شده‌اند. در این پدیده، قابلیت انحلال کانی‌های کربنات کلسیم از کلسیت کم منیزیم به کلسیت پرمنیزیم و آراگونیت افزایش می‌یابد. همین تفاوت قابلیت انحلال باعث ایجاد ترتیب خاصی از تبدیلات کانی‌شناسی بین ترکیبات کربنات کلسیم می‌شود. تشکیل حفرات در نتیجهٔ انحلال انتخابی، معمولاً فابریک فضاهای خالی در بافت سنگ ایجاد می‌نماید و تخلخل از نوع بین ذره‌ای، تخلخل قالبی و حفرات بین‌دانه‌ای را ایجاد می‌کند. در چاه مورد مطالعه، آثار انحلال را تقریباً می‌توان در تمام ذرات اسکلتی و غیراسکلتی و حتی در سیمان کلسیتی و در بلورهای دولومیت نیز مشاهده نمود. در این مطالعه علاوه بر وجود حفرات اولیه ناشی از ساختار اسکلتی، انحلال نیز درون حفرات جلبک لیتوکودیوم دیده می‌شود که باعث ایجاد تخلخل نوع *Growth framework* شده است و این حفرات چندان باهم در ارتباط نیستند. از لحاظ محیط وقوع این پدیده باید گفت انحلال در محیط دیاژنزی تحت جوی و منطقهٔ هوازده از دیگر محیط‌های دیاژنزی گسترده‌تر صورت می‌گیرد. با این‌حال، نفوذ آب‌های شیرین و حضور شورآبه‌ها یا آب‌های نفوذی که نسبت به کانی یا عنصر خاصی تحت اشباع باشند، ممکن است در هر محیطی باعث انحلال فابریک سنگ به طور کلی یا انتخابی شود. لازم به ذکر است آثار انحلالی در تخلخل‌های ریز نیز مشاهده می‌گردد. این آثار به شرایط دیاژنزی تحت‌جوی مربوط می‌گردد. در شکل ۸- (الف-د) تصاویری از پدیده دیاژنزی انحلال در چاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.



شکل ۸ فرآیند انحلال سازند داریان، میدان رشادت. الف) انحلال بخشی پوسته اسکلتی اکینودرم، عمق ۱۵۲۳/۲۷ m، ب) انحلال بخشی پوسته دوکفه‌ای، عمق ۱۵۱۹/۱۳ m، ج) انحلال بخشی پوسته دوکفه‌ای، عمق ۱۵۰۳/۰۶ m و د) انحلال بخشی کلسیت در یک پوسته اسکلتی، عمق ۱۵۵۳/۸۲ m.

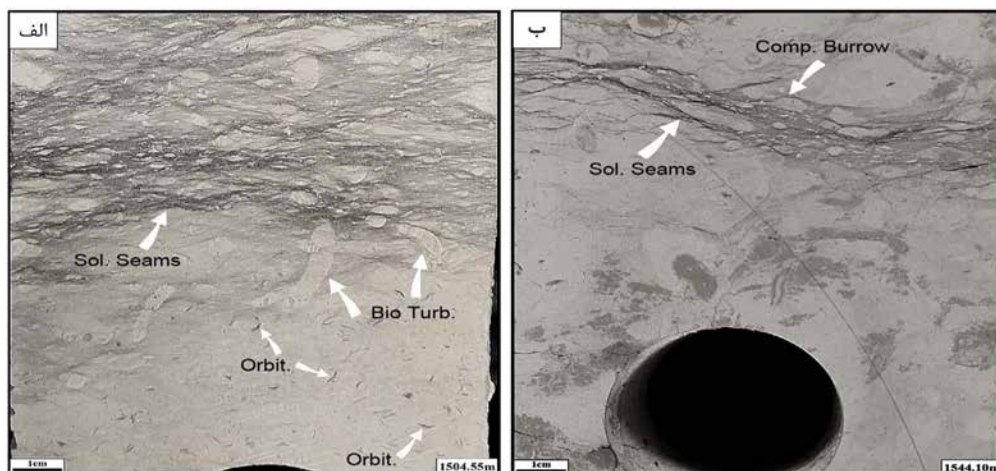
1. Fabric Selective

فشردگی مکانیکی و شیمیائی

از فرآیندهای دیاژنزی مشاهده شده در مقاطع مورد مطالعه، می توان به آثار تراکم و فشردگی در رسوبات اشاره کرد که در آهک‌های رسی دیده می‌شود. تراکم به دو صورت مکانیکی یا شیمیایی قابل تشخیص است و یکی از فرآیندهای مهم دیاژنزی در شرایط جوی و تدفینی است. در واقع تراکم و فشردگی رسوبات، ناشی از افزایش وزن طبقات رسوبی فوقانی، ضمن افزایش عمق تدفین است که با گذشت زمان هم بر شدت آن افزوده می‌شود. برای وقوع پدیدهٔ تراکم نیازی به ورود ماده از منشاء خارجی نیست بلکه خود می‌تواند منشأ انرژی برای حرکت سیالات به خارج از رسوب و ورود آن به داخل رسوبات مجاور هم باشد. این فرآیند می‌تواند باعث تغییر جهت بایوکلاست‌ها[1] به‌همراه ایجاد رگچه‌های گلی می‌شوند. همچنین اتصالات محدب و مقعر و تماس‌های طولی و مماسی (بخصوص در بلورهای دولومیت)، نشان‌دهنده تغییر شکل پلاستیکی در تراکم فیزیکی است و اتصالات مضرسی حاصل فشردگی شیمیایی و انحلال فشاری است. به دلیل شرایط تدفین کم‌عمق و ماهیت گلی ریزرخساره‌ها، استیلولایت‌های مشاهده شده در سازند داریان معمولاً دامنه کوتاه هستند و در نمونه‌هایی نیز استیلولایت‌های غیر زیگزاکی بصورت صاف و موجی قابل تشخیص است. این استیلولایت‌ها به شکل مارپیچی و گاهی دم‌اسبی مشاهده می‌گردند. فرآیند استیلولیتی‌شدن می‌تواند نقش یک مسدودکننده چرخش سیالات داشته باشد که علت آن حضور کانی‌های رسی، مواد آلی و دیگر مواد کربناته متمرکز در درزه‌های استیلولیتی است. تراکم فیزیکی و شیمیایی موجب بسته‌شدن حفره‌ها و متعاقب آن بسته‌شدن تخلخل و تراوایی و کاهش کیفیت مخزنی می‌گردد. رگچه‌های انحلالی فشاری به شکل دم‌اسبی حاوی ماده آلی و استیلولایت‌های دامنه کوتاه در شکل ۹- (الف-د) و شکل ۱۰- (الف و ب) دیده می‌شوند. -

سیمانی شدن

سیمانی‌شدن به‌عنوان مهم‌ترین فرآیند دیاژنزی کاهش‌دهنده تخلخل و کیفیت مخزن بشمار می‌رود و زمانی رخ می‌دهد که سیال های منفذی از فاز سیمان فوق‌اشباع باشند. ترکیب، بافت و ریخت شناسی سیمان در تفسیر منشأ و همچنین بازسازی تاریخچه دیاژنزی بسیار مهم می‌باشند. در نمونه‌های مطالعه شده، سیمان دروزی، سیمان هم‌بعد، سیمان بلوکی، سیمان هم‌ضخامت و سیمان رگه‌ای یافت می‌گردد.



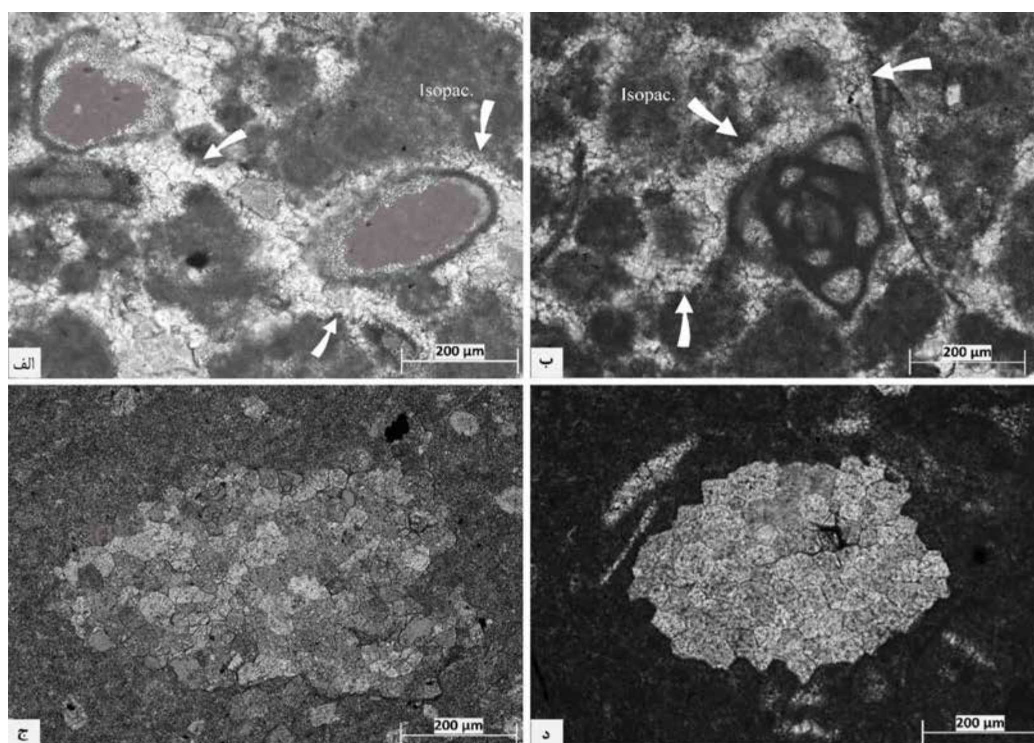
شکل ۱۰ تصاویری از مغزه‌های سازند داریان در چاه مورد مطالعه، ایجاد رگچه‌های انحلالی بر اثر فرآیند دیاژنزی تراکم. الف) رگچه‌های انحلالی، عمق ۱۵۰۴/۵۵ m، ب) رگچه‌های انحلالی حاوی هیدروکربن، عمق ۱۵۴۴/۱۰ m.

1. Reoriented Bioclast

سیمانی‌شدن تقریباً در همه ریز رخساره‌های سازند داریان در چاه مورد مطالعه، قابل مشاهده است. سیمان، درون بایوکلست‌ها، متن سنگ، بین ذرات و درون شکستگی‌ها و رگچه‌ها را پر کرده‌اند.

سیمان هم‌ضخامت، معمولاً سیمان دریایی یا جوی فریاتیک است که توسط سایر سیمان‌هایی که در مراحل دیاژنزی متئوریک و جوّی جانشین می‌گردند. این سیمان‌ها تقریباً اولیه بوده و در چاه مورد مطالعه در رخساره اینتراکلست- فرامینیفر پکستون دیده می‌شود. در شکل ۱۱- (الف)، سیمان هم‌ضخامت در اطراف پوسته‌های دوکفه‌ای و در شکل ۱۱- (ب)، در اطراف ذرات اینتراکلستی و بایوکلستی و اطراف یک گونه‌ی روزندار کفزی میلیولیدی[1] دیده می‌شود.

رگچه‌های کلسیتی حاصل از سیمان تدفینی هستند. اثرات شکستگی در نمونه‌ها به‌صورت پرشده با سیمان و یا به‌صورت پرنشده که با اپوکسی آبی رنگ‌آمیزی شده‌اند قابل تشخیص هستند. کانی‌شناسی سیمان‌ها به شیمی آب، فشار CO_3 و نسبت Mg/Ca و میزان تأمین کربنات بستگی دارد. شکل بلورها متأثر از عواملی نظیر سرعت تبلور و تمرکز عناصر منیزیم و سدیم موجود در آب است. بررسی پتروگرافی نمونه‌های سازنده نشان داد که کلسیت اسپاری بصورت پرکننده درون دانه‌ها و بین دانه‌ها در امتداد استیلولیت‌ها، شکستگی‌ها، درون حفرات ایجاد شده، توسط موجودات حفار و در تخلخل حفره‌ای و پناهگاهی تشکیل گردیده‌اند. سیمان‌های بلوکی در جلبک‌های لیتوکویوم سازند داریان که تا اندازه ۱ mm و غنی از انکلوزیون با کلیواژ شاخص حاکی از شرایط جوی یا تدفینی کم عمق هستند (شکل ۱۲- (الف)).



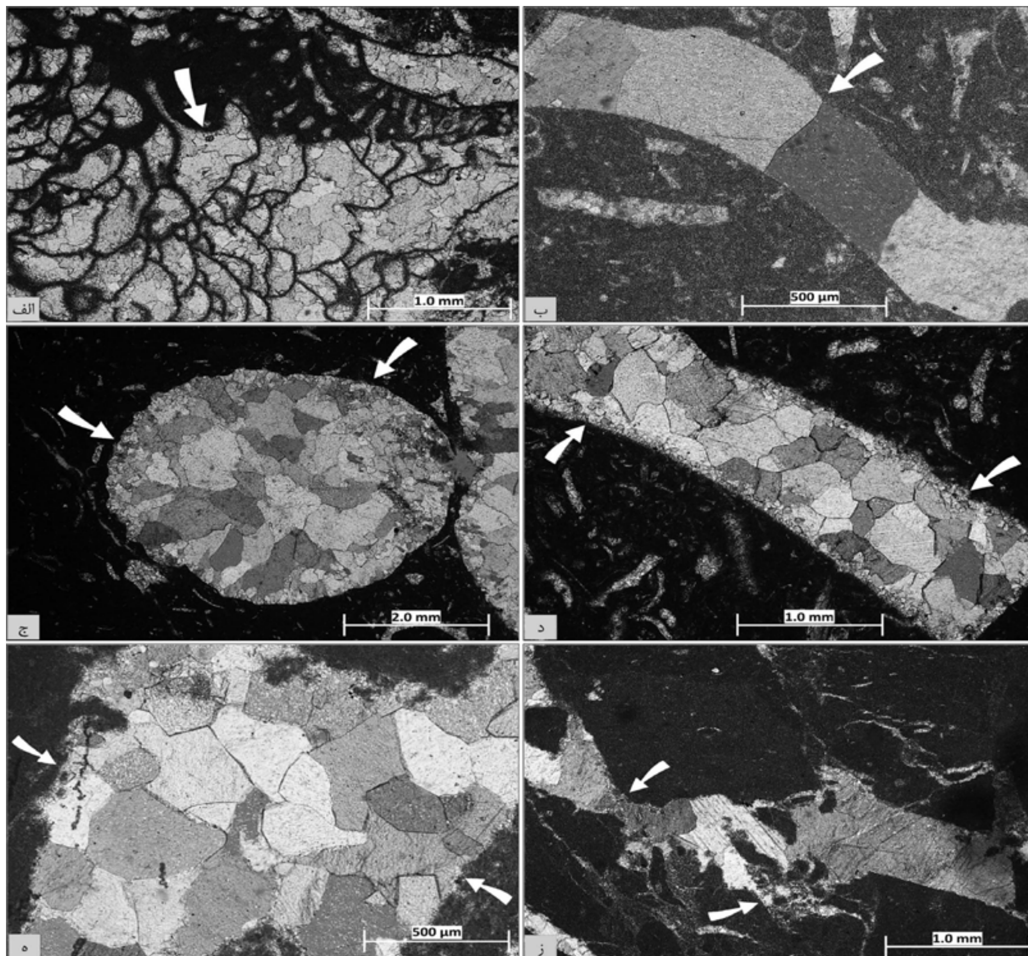
شکل ۱۱ انواع سیمان در سازند داریان، چاه رشادت. الف) سیمان هم‌ضخامت در اطراف دانه‌های اسکلتی و اینتراکلست، عمق m ۱۵۷۶/۳۶، ب) سیمان کلسیت هم‌ضخامت، در اطراف دانه‌های اسکلتی و میلیولید Moesiloculina histri، عمق m ۱۵۷۶/۳۶؛ ج و د: سیمان کلسیت هم‌بعد، بترتیب اعماق ۱۵۲۱/۷۷ و m ۱۵۱۹/۸۳.

1. *Moesiloculina histiri*

سیمان‌هایی که داخل قالب بایوکلست‌ها را پر می‌کنند اغلب به شکل دروزی می‌باشند و بعضی بر اثر انحلال بایوکلست آراگونیتی و سیمان ته‌نشست کرده که تحت عنوان جوی و تدفینی کم‌عمق است (شکل ۱۲- (ج و د)). سیمان داخل شکستگی‌ها نیز دروزی و بلوکی بوده و بعد از فشردگی و در شرایط تدفین رشد کرده‌اند (شکل ۱۲- (و)). سیمان‌های هم بعد (شکل‌های ۱۱- (ج و د)) و سیمان‌های بلوکی (شکل‌های ۱۲- (ب و ه)) نیز سیمان‌های تدفینی هستند که اندازه بلورهای آن بخصوص در سیمان بلوکی تا حدود ۱۰ mm و بیشتر نیز می‌رسد. سیمانی‌شدن با پرکردن فضاهای بین دانه‌ای و درون دانه‌ای، قالبی و شکستگی و حفره‌ها باعث کاهش تخلخل و پایین آوردن کیفیت مخزنی سازند گردند.

پیریتی شدن

پیریت در سنگ‌های رسوبی اغلب دارای منشأ دیاژنتیکی می‌باشد؛ اگر چه در شرایط همزمان با رسوب‌گذاری هم تشکیل شده و یا به‌صورت آواری وارد محیط می‌گردد. پیریت اتوژنیک معمولاً از احیای ماده آلی در محیط‌های دریایی نرمال کم اکسیژن و آب‌های شیرین تشکیل می‌شود [۳۴]. دو نوع ریخت شناسی که بیشتر متداول است شامل پیریت فرامبوئیدال و پیریت یوهدرال است. پیریت فرامبوئیدال یا دانه تمشکی شامل اگرگات‌های کروی در اندازه میکروسکوپی می‌باشد و بلورهای خودشکل و بی‌شکل دارد [۳۴]. این نوع پیریت بصورت خوشه‌های پراکنده و خردشده درون سنگ‌های آهکی میکرایتی دانه‌ریز و مارن‌ها و همچنین پیریت پرکننده درون سنگواره‌ها و حفره‌های همزمان با رسوب‌گذاری دیده می‌شود.

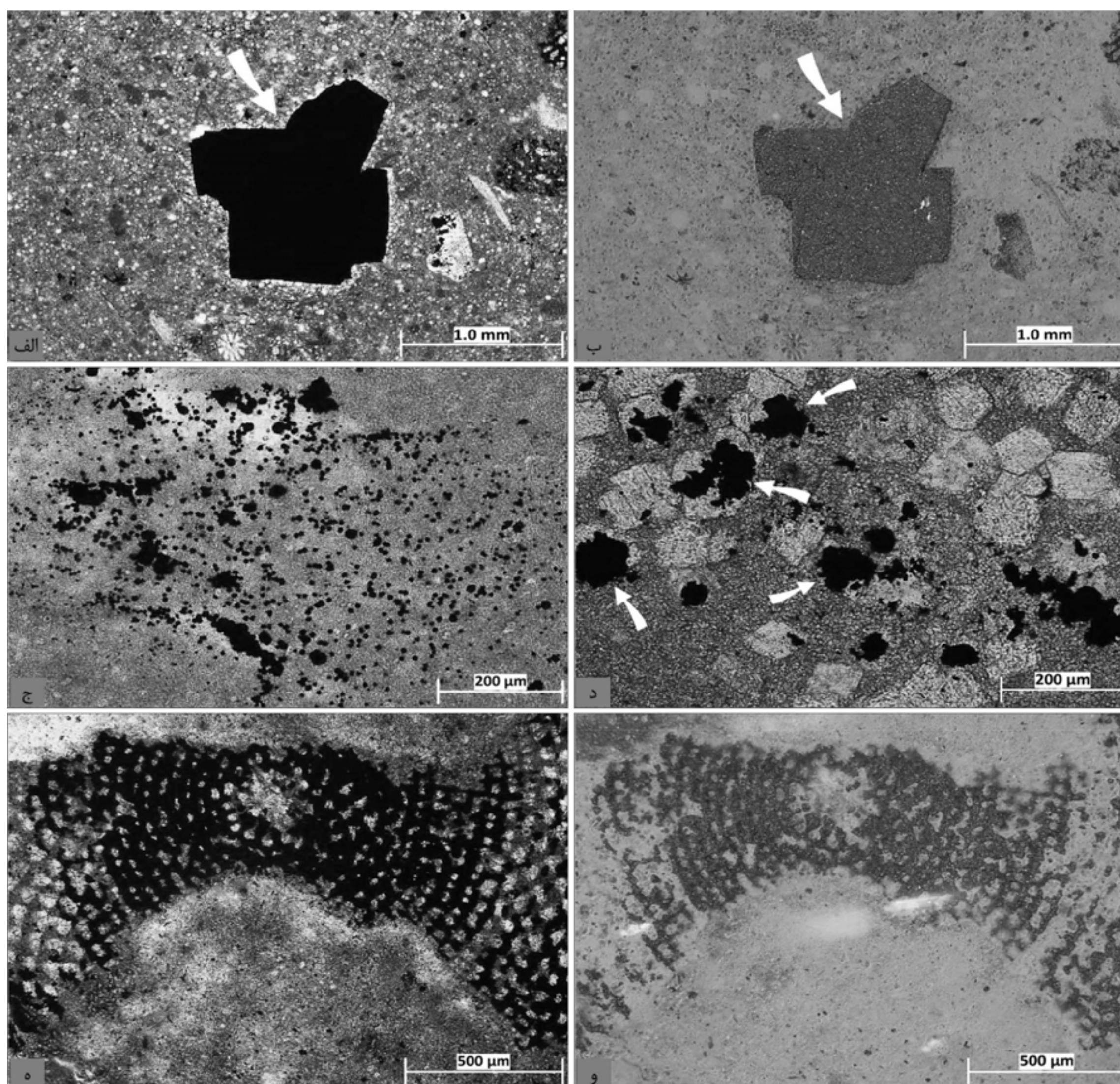


شکل ۱۲ انواع سیمان در سازند داریان، چاه رشادت. الف) سیمان هم‌بعد درون‌فسیلی، عمق ۱۵۷۳/۲۴ m، ب) سیمان کلسیت هم‌بعد، عمق ۱۵۴۹/۹۶ m، ج و د) سیمان کلسیت دروزی، بترتیب اعماق ۱۵۵۲/۳۰ و ۱۵۵۴/۲۳ m، ه) سیمان کلسیت بلوکی، عمق ۱۵۵۰/۴۶ m و و) سیمان پرکننده شکستگی‌ها، عمق ۱۵۴۸/۸۸ m.

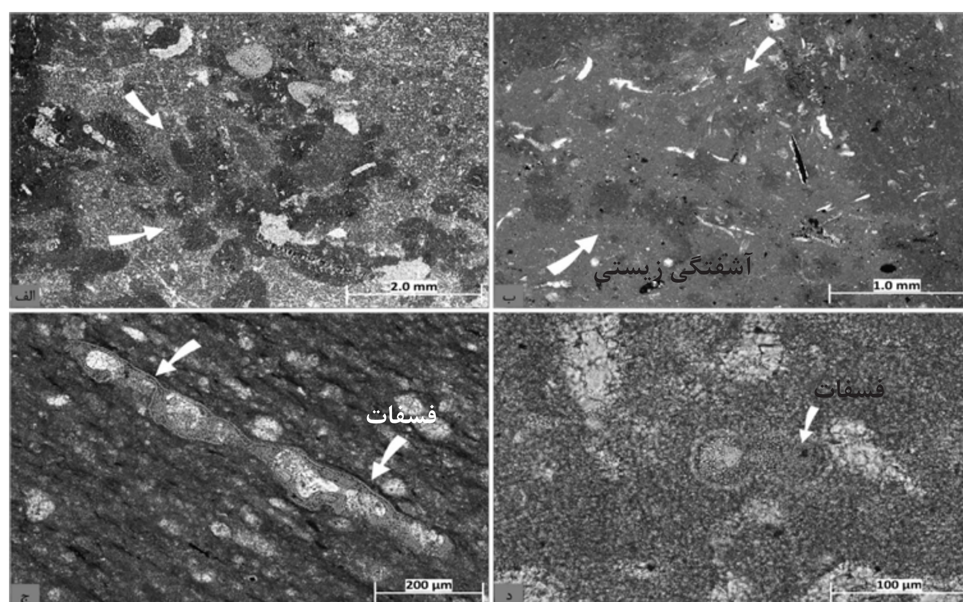
این نوع پیریت از آب‌های روزنه‌ای فوق اشباع نسبت به مونوسولفید آهن پیریت، ته‌نشین می‌شوند [۳۴] (شکل ۱۳- (الف و ب)). اما پیریت یوهدرال از آب‌های روزنه‌ای فوق‌اشباع نسبت به پیریت اما زیراشباع نسبت به مونوسولفیدآهن ته‌نشین می‌شود [۳۵]

آشفتگی زیستی

این فرآیند در محیط‌های دریای باز و به‌خصوص لاگون و در رخساره‌های گل‌پشتیبان مشاهده می‌گردد. جانوران مختلفی که در نواحی دریایی عمیق و در داخل لجن‌های آهکی زندگی می‌کنند، در همگن‌سازی مواد آهکی دانه‌ریزی که در نواحی آرام دریا تشکیل می‌شوند، نقش مهمی ایفاء می‌کنند که به صورت تغییر رنگ و تغییر بافت رسوب مشاهده می‌شود [۳۶]. اگر تحرک موجود در زمینه گلی زیاد باشد، به این زمینه گِلی اکسیژن زیادتری رسیده و رنگ زمینه روشن، ولی اگر تحرک کم باشد، رنگ زمینه گلی تیره است [۳۳]. این فرآیند تأثیر چندانی بر روی تخلخل و کیفیت مخزنی ندارد. در شکل‌های ۱۴- (الف و ب) آشفتگی زیستی به‌خوبی قابل تشخیص است.



شکل ۱۳ فرآیند دیاژنزی پیریتی‌شدن. الف) کریستال پیریت، عمق m ۱۵۰۳/۰۶، ب) جلای طلایی پیریت در زیر میکروسکوپ خاموش، عمق m ۱۵۰۳/۰۶، ج) پیریت دانه تمشکی یا فرامبوئیدال، عمق m ۱۵۴۸/۶۲، د) پیریتی‌شدن در درون بلورهای متوسط دانه دولومیت، عمق m ۱۵۱۷/۴۳ و ه - و) پیریت‌های پرکننده ساختار فسیل فرامینیفر اربیتولینید، عمق m ۱۵۰۲/۳۱.



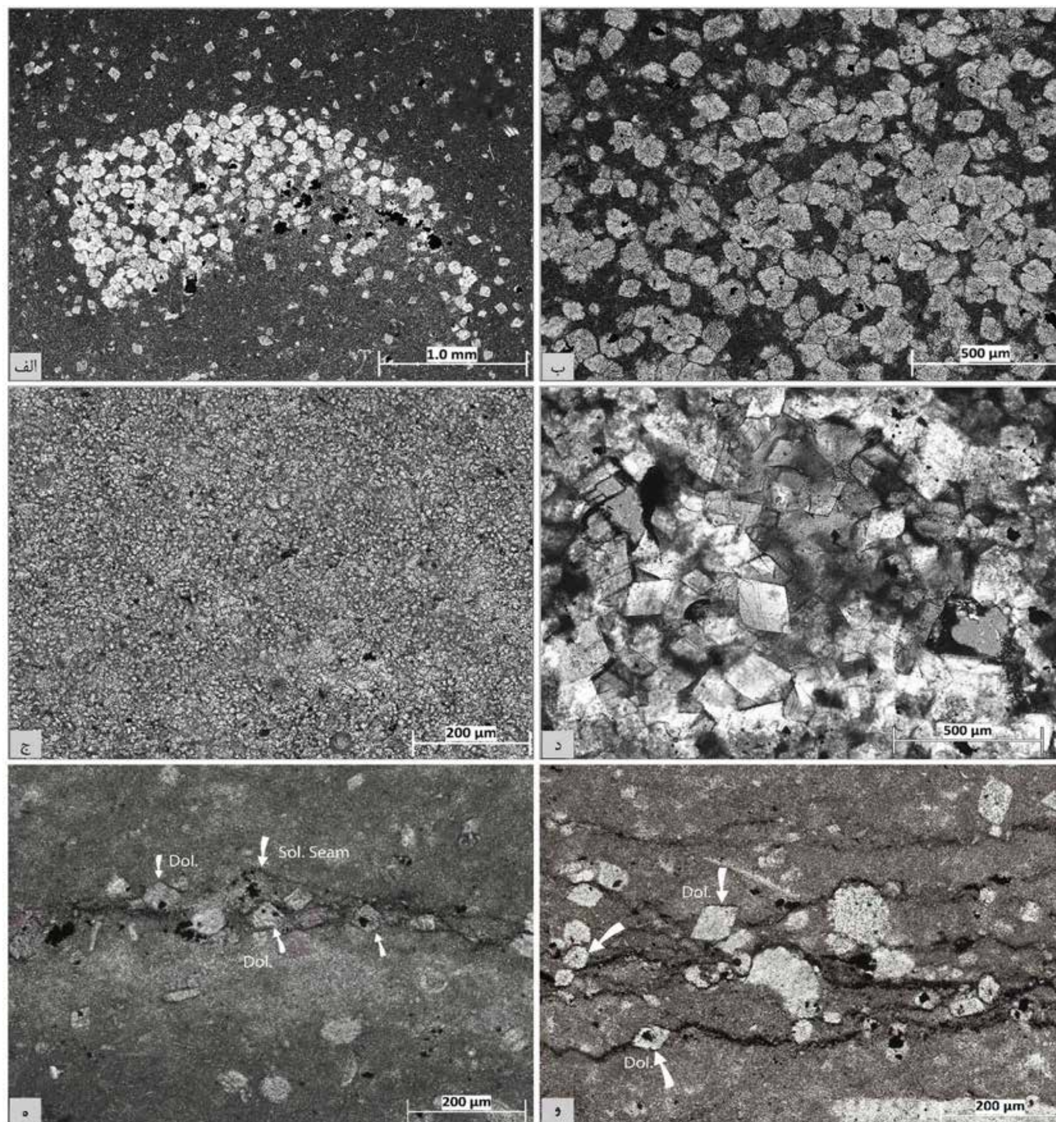
شکل ۱۴ فرآیندهای آشفتگی زیستی و فسفاتی شدن در سازند داریان . الف) عمق m ۱۵۶۹/۶۹، ب) عمق m ۱۵۷۸/۹۴، ج) جایگزینی فسفات در ساختمان‌های کربناته، عمق m ۱۵۵۳/۹۷ و د) جایگزینی فسفات در حجرات یک روزندار پلانکتونی، عمق m ۱۵۳۱/۶۳

فسفاتی شدن

کانی‌های فسفاتی دیاژنزی به صورت توده‌های گرهکی بدون وجه، سیمان یا جانشینی مشاهده می‌شوند. فسفاتی‌شدن در رخساره های سازند داریان مانند لاگون، پشته سدی و به‌خصوص رخساره دریای باز دیده می‌شود. ذرات فسفاتی در این مطالعه جایگزین ساختمان‌های کربناتی، اسکلتی و غیراسکلتی شده‌اند (شکل‌های ۱۴- (ج و د)). این فرآیند نیز تأثیری بر میزان تخلخل و کیفیت مخزنی نهشته‌های مورد مطالعه ندارد.

دولومیتی شدن

فرآیند دولومیتی‌شدن ممکن است سبب کاهش یا افزایش تخلخل شود و یا این که بر روی تخلخل تأثیر زیادی نداشته باشد که این بستگی به زمان و نوع دولومیتی شدن دارد [۳۷]. فرآیند دولومیتی‌شدن در سازند داریان فرآیند رایجی است و گسترش نسبتاً خوبی دارد. دولومیت‌های سازند داریان به صورت پراکنده در زمینه میکرایتی در محیط لاگون و بخش‌های نسبتاً عمیق دریای باز دیده می‌شوند (شکل‌های ۱۵- (الف- د)). همچنین دولومیت‌های مرتبط با رگه‌های انحلالی نیز در عمده رخساره‌های سازند داریان قابل رؤیت هستند که مرتبط با مرحله تدفینی دیاژنز هستند. انحلال زیاد پوسته خارپوستان در حاشیه رگچه‌های انحلالی و استیلولایت‌ها می‌تواند منیزیم مورد نیاز برای فرآیند دولومیتی‌شدن را تأمین کند و به همین دلیل بلورهای دولومیت در حاشیه این رگچه‌ها دیده می شوند (شکل‌های ۱۵- (ه-و)). دولومیت‌ها به شکل یوهدرال ازنوع e دارای بافت زونه و رومبیک درشت دانه هستند و تخلخل بین بلوری بین آنها قابل مشاهده هستند و دارای انکلوزیون درون بلورهای دولومیت هستند (شکل ۱۵- (د)). با توجه به اینکه گسترش بلورهای دولومیت در زمینه‌های میکرایتی و همچنین در اطراف رگچه‌های انحلالی رخ می‌دهد، و با توجه به بافت گل‌پشتیبان اولیه سازند مورد مطالعه، تنها در بخش بسیار کمی از رخساره‌های مورد مطالعه شاهد گسترش شبکه‌ای بلورهای دولومیت و به‌تبع آن گسترش تخلخل بین بلوری در آنها هستیم، به نظر می‌رسد فرآیند دولومیتی‌شدن تأثیر چندانی بر افزایش تخلخل و همچنین کیفیت مخزنی سازند داریان نداشته است.



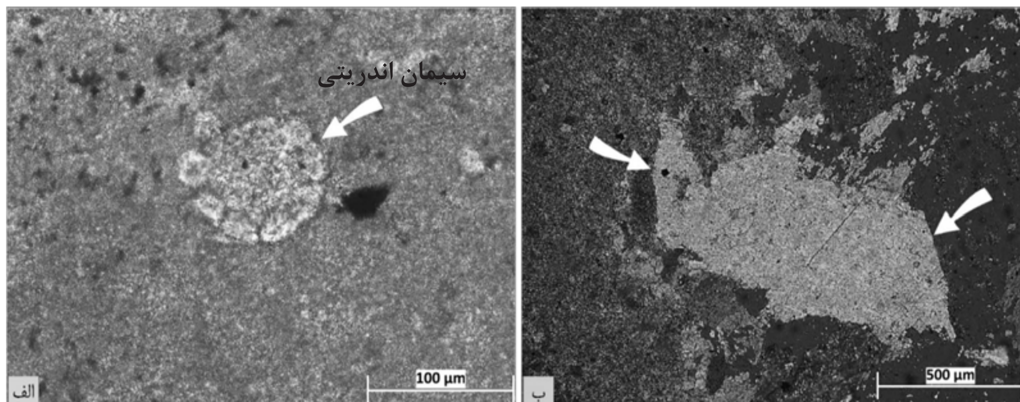
شکل ۱۵ برخی از انواع دولومیت مشاهده شده در سازند داریان، میدان رشادت. الف) دولومیکرایت، بلورهای ریز تقریباً هم اندازه پراکنده در زمینه میکرایتی، عمق m ۱۵۱۷/۴۳، ب) بلورهای متوسط دانه نیمه‌شکل تا شکل‌دار رومبیک دولومیت، عمق m ۱۵۱۶/۸۷، ج) دولومیت بسیار ریزبلور نیمه‌شکل‌دار متراکم، عمق m ۱۵۰۰/۶۲، د) بلورهای درشت دانه رومبیک دولومیت و تخلخل بین دانه‌ای در این رخساره، عمق m ۱۵۲۲/۴۹؛ ه و و: دولومیت‌های مرتبط با رگچه‌های انحلالی، بترتیب عمق m ۱۵۱۶/۴۹ و عمق m ۱۵۲۱/۷۷.

انیدریتی شدن

انیدریتی شدن جایگزینی انیدریت یا سولفات کلسیم در ساختار اسکلتی و یا کربناته زمینه سنگ‌ها، از عوامل منفی کاهش خواص مخزنی سنگ می‌باشد. در سازند داریان چاه رشادت، جایگزینی سیمان انیدریتی در ساختار اسکلتی و زمینه سنگ، هر دو به‌مقدار بسیار کم دیده می‌شود (شکل‌های ۱۶-(الف و ب)).

توالی دیاژنزی

در شکل ۱۷ تصویری از فرآیندهای دیاژنزی و تأثیر آن‌ها بر تخلخل و کیفیت مخزن در چاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶ انیدریتی‌شدن و جایگزینی سیمان انیدریتی در سازند داریان، میدان رشادت. الف) سیمان انیدریتی جایگزین ساختار اسکلتی یک خار اکینوئید، عمق m ۱۵۰۴/۶۳، ب) سیمان انیدریتی در زمینه سنگ کربناته، عمق m ۱۵۰۴/۲۴.

فرآیندها و فازهای مختلف دیاژنز			ائوژنز: دریایی	ائوژنز: متئوریک	مزوژنز (تدفینی): کم عمق	مزوژنز (تدفینی): عمیق	تلوژنز: بالاآمدگی
فرآیندهای دیاژنزی		میکریتی شدن	قرمز ــــ				
		آشفتگی زیستی	آبی ــــ				
	تراکم	فشردگی فیزیکی		قرمز ــــ	قرمز ــــ	قرمز - - -	
		فشردگی شیمیایی		قرمز ــــ	قرمز ــــ	قرمز ــــ	
	سیمانی شدن	سیمان هم ضخامت	سبز ــــ				
		سیمانی دروزی		قرمز ــــ	قرمز ــــ	قرمز ــــ	
		سیمان بلوکی و هم بعد		قرمز ــــ	قرمز ــــ	قرمز ــــ	
		سیمان پرکننده شکستگی ها				قرمز ــــ	قرمز ــــ
		تبلور مجدد	سبز - - -	سبز ــــ	سبز - - -		
		انحلال		سبز ــــ	سبز ــــ	سبز ــــ	
		دولومیتی شدن		آبی ــــ	آبی ــــ	آبی ــــ	
		انیدریتی شدن	آبی - - -	آبی ــــ	آبی ــــ		
		پیریتی شدن			قرمز ــــ	قرمز ــــ	
		فسفاتی شدن		آبی - - -	آبی - - -	آبی ــــ	
		شکستگی		سبز ــــ	سبز ــــ	سبز ــــ	سبز ــــ
Legend		آبی: تا حدودی بی‌تأثیر یا نامشخص	قرمز: کاهنده تخلخل	سبز: افزاینده تخلخل			

شکل ۱۷ توالی فرآیندهای دیاژنزی سازند داریان، چاه رشادت.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۳۲-۱۰۸

توالی دیاژنزی نشاندهنده زمان تأثیر فرآیندهای دیاژنزی می‌باشد. در سازند داریان فرآیندهای دیاژنزی در سه زمان ائوژنز، مزوژنز و تلوژنز به وقوع پیوسته‌اند. ائوژنز نخستین مرحله است که به دو صورت محیط دریایی و جوی رخ داده است. دیاژنز دریایی با فرآیندهای آشفتگی زیستی و میکرایتی‌شدن آغاز می‌شود. در دیاژنز جوی یا متئوریک، رسوبات تحت تأثیر آب‌های جوی قرار گرفته و شاهد رخ دادن فرآیندهای انحلال، دولومیتی شدن، تراکم، شکستگی و انواع سیمان بلوکی، هم بعد و دروزی هستیم. پس از مرحله ائوژنز رسوبات تحت تأثیر مرحله مزوژنز و تدفین قرار گرفته‌اند و در این مرحله دما، فشار و عمق بر روی رسوبات تأثیرگذار بوده‌اند. در دیاژنژ تدفینی، فرآیندهای دیاژنزی مانند، سیمان پرکننده رگه‌ها و شکستگی‌ها، پیریتی شدن و فسفاتی شدن رخ داده‌اند. آخرین مرحله تلوژنز است که در این مرحله شاهد بالاآمدگی و آپلیفت هستیم و در نتیجه فرآیندهای تکتونیکی، شکستگی‌ها ایجاد شده‌اند.

انیدریتی شدن

انیدریتی شدن جایگزینی انیدریت یا سولفات کلسیم در ساختار اسکلتی و یا کربناته زمینه سنگ‌ها، از عوامل منفی کاهش خواص مخزنی سنگ می‌باشد. در سازند داریان چاه رشادت، جایگزینی سیمان انیدریتی در ساختار اسکلتی و زمینه سنگ، هر دو به‌مقدار بسیار کم دیده می‌شود (شکل‌های ۱۶- (الف و ب)).

توالی دیاژنزی

در شکل ۱۷ تصویری از فرآیندهای دیازنزی و تأثیر آن‌ها بر تخلخل و کیفیت مخزن در چاه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. توالی دیاژنزی نشاندهنده زمان تأثیر فرآیندهای دیاژنزی می‌باشد. در سازند داریان فرآیندهای دیاژنزی در سه زمان ائوژنز، مزوژنز و تلوژنز به وقوع پیوسته‌اند. ائوژنز نخستین مرحله است که به دو صورت محیط دریایی و جوی رخ داده است. دیاژنز دریایی با فرآیندهای آشفتگی زیستی و میکرایتی‌شدن آغاز می‌شود. در دیاژنز جوی یا متئوریک، رسوبات تحت تأثیر آب‌های جوی قرار گرفته و شاهد رخ دادن فرآیندهای انحلال، دولومیتی شدن، تراکم، شکستگی و انواع سیمان بلوکی، هم بعد و دروزی هستیم. پس از مرحله ائوژنز رسوبات تحت تأثیر مرحله مزوژنز و تدفین قرار گرفته‌اند و در این مرحله دما، فشار و عمق بر روی رسوبات تأثیرگذار بوده‌اند. در دیاژنژ تدفینی، فرآیندهای دیاژنزی مانند، سیمان پرکننده رگه‌ها و شکستگی‌ها، پیریتی شدن و فسفاتی شدن رخ داده‌اند. آخرین مرحله تلوژنز است که در این مرحله شاهد بالاآمدگی و آپلیفت هستیم و در نتیجه فرآیندهای تکتونیکی، شکستگی‌ها ایجاد شده‌اند.

تخلخل

تخلخل یک سنگ اندازه مقدار فضای داخلی آن است که قابلیت نگهداری سیالات را دارا می‌باشد. بیشتر مخازن تخلخلی در حدود ۵ تا ۳۰٪ می‌باشند. تخلخل‌های کمتر از ۵٪ بندرت انباشته‌های اقتصادی ایجاد می‌کنند و تخلخل بیشتر از ۳۵٪ بسیار نادر است. تخلخل را می‌توان در آزمایشگاه از روی مغزه‌ها و یا با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی خصوصاً نمودار چگالی، صوتی و نوترون محاسبه کرد. همچنین از روی داده‌های لرزه‌ای نیز تخلخل قابل محاسبه است. تخلخل یک سنگ بستگی به شکل، کروی‌شدن، جورشدگی و ترتیب قرار گرفتن دانه‌ها و بافت و میزان مچوریتی و سیمانی‌شدن سنگ دارد. درسنگ‌های کربناته تخلخل عمدتاً ثانویه است و تخلخل مفید نیز تخلخلی است که منافذ آن به هم مرتبط باشند. چوکت و پری کاملترین تقسیم بندی مورد استفاده برای تخلخل را ارائه نمودند [۳۸]. در این طبقه‌بندی ۱۵ نوع تخلخل در سه گروه تخلخل وابسته به فابریک، تخلخل غیروابسته به فابریک و تخلخل‌هایی که می‌توانند به فابریک وابسته باشد یا نباشد، قرار می‌گیرند. تخلخل های مشاهده شده در سازند داریان در چاه‌های مورد

مطالعه بیشتر شامل تخلخل قالبی، شکستگی یا فراکچر، حفره‌ای، درون‌بلوری و بین‌بلوری است که در بسیاری از موارد این فضاهای خالی توسط سیمان پرشده‌اند.

تخلخل قالبی

تخلخل قالبی بوسیله شسته‌شدن انتخابی اجزای سنگ مثل فسیل‌های روزن‌دار، دوکفه‌ای و کانی‌های تبخیری و اائیدها شکل می گیرد. تفاوت در ترکیب کانی‌شناسی کربنات‌ها و شرایط متغیر دیاژنزی در سرعت تشکیل این تخلخل موثر است، بطوریکه در شرایط دیاژنزی جوی، کلسیت پرمنیزیم به کم‌منیزیم .تبدیل می‌شود. اندازه حفرات، به دانه‌ی حل‌شده و شدت انحلال بستگی دارد. این نوع تخلخل اگر دارای ماتریکس گل‌پشتیبان باشد، مانند آنچه که در رخساره‌های مورد مطالعه سازند داریان مشاهده می شود، دارای نفوذپذیری و تراوایی کمتری است، مگراینکه عوامل دیگری چون شکستگی یا تخلخل بین‌بلوری باعث ایجاد ارتباط آن ها شود که در این حالت تراوایی نیز افزایش می‌یابد [۳۹]. بنابراین در بسیاری از رخساره‌های گل‌پشتیبان مورد مطالعه، با وجود بالا بودن تخلخل، شاهد تراوایی اندک و کاهش کیفیت مخزنی هستیم. تخلخل قالبی در عمده رخساره‌های مورد مطالعه، مشاهده می گردد. در شکل‌های ۱۸- (الف و ب) بترتیب تخلخل قالبی ایجادشده در حجرات روزنداران کفزی *Praechrysalidina* و *Siphovalvulina* دیده می‌شود.

تخلخل شکستگی[1]

تخلخل شکستگی از انواع مهم تخلخل می‌باشد که عمدتاً در سنگ‌های شکننده شکل می‌گیرد تا در سنگ‌هایی که خاصیت پلاستیکی بیشتری دارند. در این حالت اگرچه تخلخل سنگ واقعاً ممکن است بالا نرود، ولی سنگ تراوایی زیادی پیدا خواهد کرد. با توجه به اینکه رخساره‌های مورد مطالعه عمدتاً گل‌پشتیبان و مادستون تا وکستونی هستند، شکستگی و تخلخل حاصل از این فرآیند می‌تواند به عنوان عاملی موثر در افزایش تخلخل و تراوایی باشد و کیفیت مخزنی سازند را افزایش دهد. برخی شکستگی‌ها در رخساره‌های مورد مطالعه، با سیمان کلسیت اسپاری و بلوکی پرشده‌اند، اما برخی شکستگی‌ها نیز باز بوده و یا اینکه انحلال باعث باز شدن مسیر و افزایش تخلخل و تراوایی می‌گردد. این نوع تخلخل ممکن است براثر تکتونیک، ریزش و لغزش در سنگ‌های آهکی ایجاد شود (شکل‌های ۱۸- (ج و د)).

تخلخل حفره‌ای

یکی از انواع تخلخل ثانویه است که از طریق انحلال قطعات بزرگ نظیر ماکروفسیل‌ها در سنگ‌های کربناته ایجاد می‌شود. این نوع تخلخل می‌تواند منجر به تشکیل حفرات بزرگ، ژئودها و حتی غارها شود. در سازند داریان در رخساره‌های حاوی جلبک لیتوکودیوم، وجود حفرات اولیه بزرگ در شبکه ساختار اسکلتی آنها و یا انحلال قطعات بزرگی از لیتوکودیوم، باعث بوجود آمدن تخلخل‌های بزرگ و حفره ای شده است (شکل ۱۸- (ه-و)).

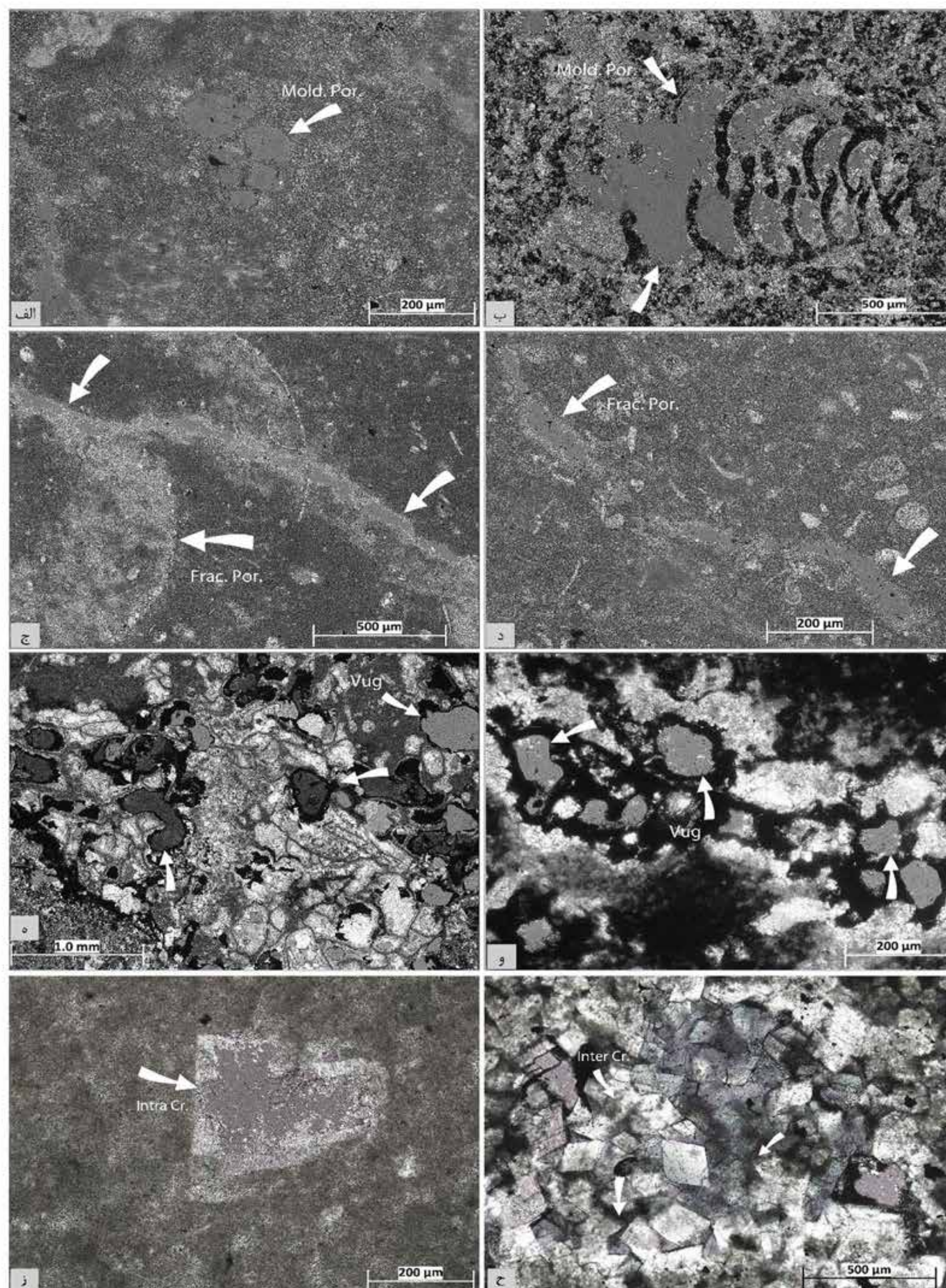
تخلخل درون بلوری

یکی از انواع تخلخل که از طریق انحلال انتخابی و ایجاد فضای خالی در ماتریکس متبلور مانند دولومیت، کلسیت و یا انیدریت ایجاد می‌شود. در این نوع تخلخل شکل اصلی و اولیه بلور قابل تشخیص است و در حقیقت یک تخلخل قالبی بلور است. در شکل ۱۸- (ز) تصویر تخلخل درون بلوری در یک بلور رومبوئدر مشاهده می‌شود.

تخلخل بین بلوری

خلل و فرج و فضاهای کوچکی که در بین بلورها و بخصوص در شبکه بلورهای رومبوئدر دولومیتی گسترش یافته‌ی در زمینه سنگ بوجود می‌آید، باعث ایجاد تخلخل بین‌بلوری و افزایش کیفیت مخزنی می‌گردد.

1. *Fracture Porosity*



شکل ۱۸ انواع تخلخل در سازند داریان، چاه رشادت؛ الف) تخلخل قالبی، عمق ۱۵۷۷/۵۵ m، ب) تخلخل قالبی، عمق ۱۵۲۹/۲۹ m، ج و د) تخلخل شکستگی، به‌ترتیب اعماق ۱۵۱۷/۲۴ و ۱۵۳۱/۴۲ m، ه) تخلخل حفره‌ای، عمق ۱۵۷۰/۶۳ m، و) تخلخل حفره‌ای، عمق ۱۵۷۱/۲۵ m، ز) تخلخل درون بلوری، عمق ۱۵۲۳/۳۸ m و ح) تخلخل بین بلوری، عمق ۱۵۲۲/۴۹ m.

در شکل ۱۸- (ح) تصویری از تخلخل بین‌بلوری موجود در شبکه دولومیت‌های رومبوئدر مشاهده می‌شود که این فضاهای خالی بعلت بلودای شدن اسلاید با اپوکسی آبی، بوضوح و با رنگ آبی مشخص است.

میانگین تخلخل و تراوایی رخساره ها

بررسی میانگین تخلخل و تراوایی بدست آمده از مغزه‌های سازند داریان در چاه مورد مطالعه و انطباق داده‌های تخلخل و تراوایی با ریزرخساره های مختلف سازند داریان، بیانگر نکات ارزنده و

قابل توجهی در مورد کیفیت مخزنی سازند مورد مطالعه است. ریزرخساره‌های گل‌پشتیبانِ اول تا سوم سازند داریان، شامل پلاژیک فرامینیفرا وکستون/مادستون، پلاژیک گاستروپودا وکستون و بایوکلاست وکستون/مادستون، که رخساره‌های ضعیف مخزنی محسوب می‌شوند، به ترتیب دارای میانگین تخلخل ۲۷، ۲۳ و ۲۸٪ بوده ولی همگی آنها دارای تراوایی نسبتاً ضعیف و به‌ترتیب در حدود ۱، ۱/۵ و ۲/۳ mD هستند. نوع منافذ در این رخساره‌ها عمدتاً از نوع منافذ حفره‌ای و شکستگی‌های بسیار ریز غیرمرتبط با هم است. میزان تخلخل در رخساره چهارم یا بایوکلاست- اربیتولینا وکستون/مادستون بین ۱۰ تا ۳۴٪ (میانگین ۲۳٪) و میانگین تراوایی آن پایین و در حدود ۲/۵ mD است که بیانگر کیفیت مخزنی پایین است. نوع تخلخل در این رخساره نیز حفره‌ای، شکستگی ریز و قالبی است. ریزرخساره شماره ۵ یا فرامینیفر- لیتوکودیوم فلوتستون با میانگین تخلخل ۳۰٪ و تراوایی حدود ۳ mD از لحاظ مخزنی شرایط بهتری را نسبت به ریزرخساره‌های قبلی داراست و در نمونه‌های مغزه این رخساره آثار آغشتگی نفت دیده می‌شود. اما ریزرخساره ششم یا لیتوکودیوم- باندستون همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود، با میانگین تخلخل ۲۵٪ و تراوایی ۱۰میلی دارسی بهترین رخساره مخزنی را در بین رخساره‌های سازند داریان در این میدان داراست. آغشتگی نفتی بسیار خوب و دارا بودن انواع تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای نسبتاً متصل بهم و تخلخلِ شکستگی، باعث ایجاد کیفیت مخزنی مناسب و رخساره‌ای تراوا در این بخش شده است. ریزرخساره اینتراکلست- فرامینیفر وکستون/ پکستون نیز رخساره‌ای با تخلخل حدود ۲۸٪ و تراوایی ضعیف تا متوسط ۳/۵ mD است. عمده تخلخل‌های موجود در این رخساره حفره‌ای و قالبی بوده و حاوی آغشتگی نفتی ضعیفی می‌باشد. ریزرخساره ترکیبی بایوکلاست پکستون/ وکستون حاوی ذرات ماسه دارای میانگین تخلخل ۱۰٪ و تراوایی بسیار پایین ۰/۱۵ mD است که دارای کیفیت مخزنی پایینی است. میانگین تخلخل و تراوایی ریزرخساره‌های مختلف سازند داریان در جدول ۱ دیده می‌شود.

جدول ۱ میانگین تخلخل و تراوایی بدست آمده از آنالیز معمولی مغزه در هر یک از ریزرخساره های سازند داریان در چاه مورد مطالعه.

ریز رخساره	نام ریزرخساره	میانگین تخلخل براساس روش حسابی (Arithemic)	
		تخلخل (درصد)	تراوایی (mD)
MF-1	فرامینیفر پلاژیک وکستون/مادستون *(Pelagic Foraminifera Wackestone/Mudstone)*	۲۶/۸	۱/۰۶
MF-2	گاستروپود پلاژیک وکستون *(Pelagic Gastropoda Wackestone)*	۲۳/۰۷	۱/۵۴
MF-3	بایوکلاست وکستون/ مادستون *(Bioclastic Wackestone/Mudstone)*	۲۷/۸	۲/۳
MF-4	بایوکلاست اوربیتولینا وکستون/ مادستون *(Bioclastic, Orbitolina Wackestone/Mudstone)*	۲۳/۱	۲/۶
MF-5	فرامینیفر- لیتوکودیوم فلوتستون *(Foraminifera, Lithocodium Floatstone)*	۲۹/۲	۳
MF-6	لیتوکودیوم باندستون *(Lithocodium Boundstone)*	۲۴/۳	۱۰/۲۵
MF-7	اینتراکلست فرامینیفر وکستون/ پکستون *(Intraclast, Foraminifera Wackestone/Packstone)*	۲۸/۳	۳/۵۶
MF-8	رخساره ترکیبی بایوکلاست پکستون/وکستون حاوی ذرات تخریبی *(Sandy, mixed bioclastic Packstone/Wackestone)*	۱۰	۰/۱۵

نتیجه‌گیری

در ایـن مطالعـه مقاطـع نـازک میکروسـکوپی اخـذ شـده از مغزه‌هـای سـازند داریـان در یـک چـاه از میدان‌هـای نفتـی جنوب‌شـرقی خلیج‌فـارس مـورد مطالعـه قـرار گرفـت. سـازند داریـان در ایـن چـاه دارای ضخامـت ۷۵/۲ m سـنگ‌آهک، آهک‌مارنـی بـا برخـی میـان لایه‌هـای شـیلی اسـت کـه مـرز پاییـن آن بـا سـازند هـوار و مـرز بـالای آن بـا سـازند نهرعمـر هـر دو پیوسـته اسـت.

بررسـی‌های میکروسـکوپی ایـن سـازند منجـر بـه شناسـایی ۷ رخسـاره کربناتـه و یـک رخسـاره میکـس آواری- کربناتـه زیـر گردیـد:

(MF-1 فرامینیفـر پلاژیـک وکستون/مادسـتون، MF-2) گاسـتروپود پلاژیـک وکسـتون، MF-3) بایوکلاسـت وکسـتون/ مادسـتون، MF-4) بایوکلاسـت اوربیتولینـا وکسـتون/ مادسـتون، MF-5) فرامینیفـر لیتوکودیـوم فلوتسـتون، MF-6) لیتوکودیـوم باندسـتون، MF-7) اینتراکلسـت فرامینیفـر وکسـتون/ پکسـتون و MF-8) رخسـاره میکـس بایوکلاسـت پکستون/وکسـتون حـاوی دانه‌هـای تخریبـی کـه نمایانگـر نهشـته شـدن آن در یـک محیـط رمـپ کربناتـه از رمـپ داخلـی تـا حوضـه ژرف بـوده اسـت.

مطالعـه محیـط رسـوبی بـا اسـتفاده از رخسـاره‌های مطالعـه شـده انجـام گردیـد و بـا توجـه بـه وجـود ریف‌هـای کومـه‌ای ایجـاد شـده توسـط جلبک‌هـای لیتوکودیـوم کـه توانایـی سـاختن ریف‌هـای بـزرگ و تغییـر توپوگرافـی حوضـه را نداشـته‌اند، همچنیـن نبـود رسـوبات ریزشـی و لغزشـی و تغییـر تدریجـی رخسـاره‌ها نسـبت بـه یکدیگـر، حوضـه رسـوب‌گذاری ایـن سـازند از نـوع یـک رمـپ کربناتـه کم‌شـیب هموکلینـال پیش‌بینـی گردیـد.

بررسـی فرآیندهـای دیاژنـزی ایـن سـازند نشـان داد کـه میکرایتـی شـدن، انحلال، فشـردگی مکانیکی و شـیمیائی (ایجـاد رگچه‌هـای انحلالـی و اسـتیلولایت‌های دامنـه کوتـاه)، آشـفتگی زیسـتی، پیریتی‌شـدن، سیمانی‌شـدن (سـیمان‌های هم‌ضخامـت، هم‌بعـد، دروزی، بلوکـی و پرکننـده رگـه)، دولومیتی‌شـدن، فسفاتی‌شـدن و انیدریتی‌شـدن از مهمتریـن فرآیندهـای دیازنزی هسـتند کـه بشـدت کنتـرل کیفـی مخـزن کربناتـه سـازند داریان را تحـت کنتـرل دارنـد. بـا توجـه بـه وجـود آزمایشـات معمولـی مغـزه و وجـود اطلاعـات تخلخـل و تراوایـی رخسـاره‌ها، میانگیـن درصـد تخلخـل و تراوایـی هـر کـدام از رخسـاره‌ها بـا روش حسـابی اندازه‌گیـری شـد کـه بیانگـر ایـن بـود کـه افزایـش تخلخـل و تراوایـی در رخسـاره فلوتستون-باندسـتونی لیتوکودیـوم‌دار در اثـر ایجـاد تخلخـل حفـره‌ای و همچنیـن متصـل بـودن بهتـر ایـن حفـرات بهـم می‌باشـد کـه باعـث گردیـده اسـت ایـن رخسـاره مهم‌تریـن بخـش مخزنـی سـازند مزبـور در چـاه مـورد مطالعـه قلمـداد گـردد. همچنیـن بـا بررسـی فرآیندهـای دیاژنـزی مشـخص گردیـد کـه سیمانی‌شـدن در برخـی رخسـاره‌های گل‌پشـتیبان وکسـتون پکسـتونی نیـز از از مهمتریـن عوامـل کاهـش دهنـده کیفیـت مخزنـی ایـن سـازند در رخسـاره‌های مزبـور می‌باشـد.

مراجع

[1]. Purser B H (Ed.) (1973) The Persian Gulf. holocene carbonate sedimentation and diagenesis in a shallow epicontinental sea, Limnology and Oceanography, 19, 2: 376-376, doi.org/10.4319/lo.1974.19.2.0376.
[2]. Van Buchem F S P, Al-Husseini M I, Maurer F, Droste H J, Yose L A (2010) Sequence-stratigraphic synthesis of the Barremian- Aptian of the eastern Arabian Plate and implications for the petroleum habitat, Barremian – Aptian Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Eastern Arabian Plate, 4, 1: 9-48.
[3]. Sharland P, Archer R, Casey D, Davies R, Hall S, Heward A, Horbury A, Simmons M (2001) Sequence stratigraphy of the arabian plate, Arabian plate sequence stratigraphy – revisions to SP2, 9, 1: 199–214, doi.org/10.2113/geoarabia0901199.
[۴]. آقانباتی ع (۱۳۸۳) زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران، ۳۵۷-۱.
[5]. James G A, Wynd J G (1965) Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area: Ameri-

can Association of Petroleum Geologists Bulletin, 49, 12: 2182–2245, doi.org/10.1306/A663388A-16C0-11D7-8645000102C1865D.
[6]. Rezaeian H, Taheri A (2012) Biostratigraphy and depositional history of Coniacian-Santonian succession in East of Ramhormoz area (Tange-Bulfaris section), 2, 1, 41-53.
[۷]. شـمیرانی ا، سـید امامـی ک، امیـری بختیـار ح، قلاونـد ه (۱۳۷۹) یافته‌هـای نویـن سـنگ چینه‌شناسـی و زیسـت چینه‌شناسـی سـازندهای داریـان و کژدمـی در جنـوب غـرب ایـران، چهارمیـن همایـش انجمـن زمیـن شناسـی ایـران، دانشـگاه تبریـز.
[۸]. رحیـم پـور بنـاب ح، مـرادی م، ناصـری ز، رضایـی، م ر (۱۳۸۱) ویژگی‌هـای مخزنـی و محیـط رسـوبی سـازند داریـان در خلیـج فـارس (از تنگـه هرمـز تـا منتهـی الیـه شـمال غربـی خلیـج فـارس)، دانشـگاه تهـران.
[۹]. لاسـمی ی، سـیاهی م (۱۳۸۴) محیط‌هـای رسـوبی و چینه‌نـگاری سکانسـی سـازند داریـان در بخـش جنوبـی فروافتادگـی دزفـول، بـرش خامـی و چـاه سـولابدر-۳، نهمیـن همایـش انجمـن زمین‌شناسـی ایـران.
[۱۰]. پورباقـر م، آدابـی م ح، صادقـی ع، قلاونـد ه (۱۳۸۵) مقایسـه میکروفاسـیس و محیـط رسـوبی سـازند داریـان در تاقدیـس آنـه و چـاه چلینگـر ۳، بیسـت و پنجمیـن گردهمایـی علـوم زمیـن، سـازمان زمیـن شناسـی و اکتشـافات معدنـی کشـور.
[۱۱]. آدابـی م ح، عباسـی ر (۱۳۸۸) تاریخچـه دیاژنـزی سـازند داریـان بـر اسـاس مطالعـات پتروگرافـی و ژئوشـیمیایی در کـوه سـیاه واقـع در شـمال شـرق شـیراز و چـاه شـماره ۱ سبزپوشـان، نشـریه علـوم دانشـگاه تهـران.
[۱۲]. امیـری م، رحیـم پـور بنـاب ح، اسـدی ا، صرفـی م (۱۳۸۸) محیـط رسـوبی و چینه‌نـگاری سکانسـی سـازند داریـان در میـدان پـارس جنوبـی، نشـریه پژوهش‌هـای چینه‌نـگاری و رسوب‌شناسـی، ۲۱.
[۱۳]. سـعدی راد ف، موسـوی حرمـی ر، محبوبـی ا، محمـودی قرائـی م ح، آرمـون ا (۱۳۸۹) تاریخچـه رسـوب‌گذاری و پـس از رسـوب‌گذاری سـازند داریـان در میـدان نفتـی آزادگان، بیسـت و نهمیـن گردهمایـی علـوم زمیـن، سـازمان زمیـن شناسـی و اکتشـافات معدنـی کشـور، ۸-۱.
[۱۴]. امیری م (۱۳۹۰) محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی سازند داریان در میدان گازی پارس جنوبی، ۲۱.
[۱۵]. موسـوی زاده م (۱۳۹۸) لایه‌هـای قرمـز اقیانوسـی کرتاسـه، مدلـی بـرای بررسـی تغییرات سـریع شـرایط ژئوشـیمیایی در محیط‌هـای رسـوبی عمیـق، دو فصلنامـه رسوب‌شناسـی کاربـردی، ۷، ۱۴، ۴۵-۳۴.
[16]. Mehrabi H, Rahimpour-Bonab H, Al-Aasm I, Hajikazemi E, Esrafili-Dizaji B, Dalvand M, Omidvar M (2018) Palaeo-exposure surfaces in the Aptian Dariyan Formation, Offshore SW Iran, Geochemistry and reservoir implications, Journal of Petroleum Geology, 41, 4: 467–494, doi.org/10.1111/jpg.12717.
[17]. Bahrehvar M, Mehrabi H, Rahimpour-Bonab H (2020) Coated grain petrography and geo-chemistry as palaeo-environmental proxies for the Aptian strata of the southern NeoTethys Ocean, Persian Gulf, Iran, Facies, 66, 1:3,1-23.
[18]. Insalaco E, Virgone A, Courme B, Gaillot J, Kamali M, Moallemi A, Lotfpour M, Monibi S (2006) Upper dalan member and kangan formation between the zagros mountains and offshore Fars, Iran: depositional system, biostrati-graphy and stratigraphic architecture, GeoArabia, 11: 75–176, doi.org/10.2113/geoarabia110275.
[19]. Ghazban F (2007) Petroleum geology of the Persian Gulf, Tehran University and National Iranian Oil Company, ISBN: 964-03-9420-3, 722.
[20]. Alsharhan A S (2014) Petroleum systems in the Middle East. In: Rollinson H R, Searle M P, Abbasi A I, Al-Lazki A I, Al Kindi M H (Eds) Tectonic Evolution of the Oman Mountains, 392, Geological Society London 361-408, https://doi.org/10.1144/SP392.19.
[21]. Alsharhan A S (1985) Depositional environments, reservoir units evolution and hydrocarbon habitat of shuaiba formation, lower cretaceous, Abu Dhabi, United Arab Emirates, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 69: 899-912, doi.org/10.1306/AD462B19-16F7-11D7-8645000102C1865D.
[22]. Alsharhan A S, Nairn A E M (1986) A review of the Cretaceous formations in the Arabian Peninsula and Gulf: Part I. Lower Cretaceous (Thamama Group) stratigraphy and paleogeography, Journal of Petroleum Geology, 9: 365-392, doi.org/10.1111/j.1747-5457.1986.tb00400.x.
[23]. Al-Husseini M (2007) Iran’s crude oil reserves and production, GeoArabia, 12, 2: 69–94, doi.org/10.2113/

geoarabia120269.
[24]. Alsharhan A S, Nairn A E M (1993) Carbonate platform models of arabian cretaceous reservoir, In: Simo J A T, Scott R W, Masse J P (Eds) Cretaceous Carbonate Platforms, American association of Petroleum Geologists Memoir 56, 173-184.
[25]. Alsharhan A S, Al-Aasm I S, Saleh M G (2000) Stratigraphy, stable isotopes, and hydrocarbon potential of the aptian shuaiba formation, U.A.E., SEPM Society for Sedimentary Geology, 69, doi.org/10.2110/pec.00. 69.
[26]. Moshier S O (1989) Development of microporosity in a micritic limestone reservoir, Lower Cretaceous, Middle East. Sedimentary Geology, 63, 3-4: 217–240, doi.org/10.1016/0037-0738(89)90133-4.
[27]. Dunham R J (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture In: Ham W E, Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir,1: 108-121.
[28]. Embry Z R, Klovan E J (1972) Absolute water depth limits of late Devonian paleoecological zones, Geologische Rundschau, 61: 672–686.
[29]. Wilson J L (1975) Carbonate facies in geologic history, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 148–168.
[30]. Flügel E (2004) Carbonate depositional environments, Microfacies of Carbonate Rocks, Berline, Springer, 976, doi: 10.1007/978-3-662-08726-8_2.
[31]. Moradpour M, Zamani Z, Moallemi, S A (2008) Controls on reservoir quality in the lower triassic kangan formation, Southern Persian Gulf, Journal of Petroleum Geology, 31, 4: 367–385, doi.org/10.1111/j.1747-5457.2008.00427.x.
[32]. Assadi A, Honarmand J, Moallemi S A, Abdollahie-Fard I (2016) Depositional Environments and Sequence Stratigraphy of the Sarvak Formation in an Oil Field in the Abadan Plain, SW Iran: Facies, 62, 4: 1-22.
[33]. Longman M W (1980) Carbonate diagenetic textures from near surface diagenetic environments. American Association of Petroleum Geology Bulletin, 64: 461-487.
[34]. Flügel E (2010) Analysis, Interpretation and Application, Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application, Springer, Heidelberg, 633, ISBN: 978-3-642-03796-2.
[35]. Raiswell R, Berner, R A (1985) Pyrite formation in euxinic and semi-euxinic sediments, American Journal of Science., 285: 710–724, doi:10.2475/ajs.285.8.710.
[36]. Burchette T P, Britton S R (1985) Carbonate facies analysis in the exploration for hydrocarbons: a case-study, from the Cretaceous of the Middle East, Geological Society, London, Special Publications, 18, 1: 311-338, doi.org/10.1144/GSL.SP.1985.018.01.13.
[37]. Mazzullo S J (2000) Organogenic dolomitization in peritidal to deep-sea sediments, Journal of Sedimentary Research, 70: 10–23, doi.org/10.1306/2DC408F9-0E47-11D7-8643000102C1865D.
[38]. Choquette P W, Pray L C (1970) Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 54: 207-250, doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D.

[۳۹]. رضایی م ر (۱۳۸۴) زمین شناسی نفت، چاپ دوم، سازمان آموزشی و انتشاراتی فرهیختگان علوی، تهران.

اثر طول زنجیر بخش کاتیونی مایع‌یونی بر پایه امیدازولیوم بر ضریب پخش شوندگی نفت خام برروی سنگ دولومیتی در حضور یون‌های سولفات و کلراید

محمد براری، مصطفی لشکربلوکی* و رضا عابدینی

گروه مهندسی شیمی، آزمایشگاه ازدیادبرداشت نفت و فرآوری گاز، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

چکیده

سیلاب‌زنی سورفکتانت به‌دلیل مزایای عمده آن، به‌ویژه کاهش کشش‌بین‌سطحی (IFT) نفت‌خام/شورآب و تغییر ترشوندگی به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در فرآیند ازدیاد برداشت نفت شناخته شده است. تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر نوع یون‌های موجود در فاز آبی بر کارآیی سورفکتانت‌های بر پایه مایع‌یونی از خانواده امیدازولیوم با طول زنجیره کاتیونی متفاوت در بهبود این دو مکانیسم انجام شده است. برای بررسی هم‌زمان این دو مکانیسم، کار چسبندگی و پیوستگی و ضریب پخش شوندگی محاسبه شد. سورفکتانت‌های [C_{12} mim][Cl] و [C_{18} mim][Cl] در حضور الکترولیت‌های NaCl و Na_2SO_4 مورد بررسی قرارگرفته اند. بر اساس غلظت بحرانی مایسل (CMC)، کارآیی سه غلظت از مایعات یونی (کمتر از CMC، و بیشتر از CMC) در تغییر ترشوندگی و بهبود ضریب پخش شوندگی نفت برروی سنگ کربناته دولومیتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان‌داد عملکرد مایع‌یونی با افزایش طول زنجیر وابسته به نوع نمک است اگرچه اهمیت غلظت سورفکتانت بیشتر از نوع نمک بوده است. به‌طور کلی، کاهش کشش‌بین‌سطحی عملکرد محلول در تغییر ترشوندگی را بهبود داده است. کمترین کشش‌بین‌سطحی و بالاترین فعالیت سطحی برای محلول [C12mim][Cl]/NaCl با IFT برابر ۰/۶ mN/m در غلظت های بالاتر از CMC به‌دست آمده است که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی نمک با آنیون Cl^- و مایع یونی [C_{12}mim][Cl] در کاهش کشش بین سطحی است که باعث تغییر ترشوندگی سنگ کربناته دولومیتی از حالت شدیداً نفت‌دوست به حالت آب دوست شده است. این دو سازوکار باعث گردید بالاترین ضریب پخش شوندگی برای مایع‌یونی با طول زنجیر کوتاه‌تر ([C_{12}mim][Cl]) و در حضور نمک NaCl به‌دست آید.

کلمات کلیدی: مایعات یونی، سورفکتانت، ضریب پخش شوندگی، کشش‌بین‌سطحی، تغییر ترشوندگی

مقدمه

در تعداد بسیار زیادی از مخازن هیدروکربنی موجود در دنیا که ساختار سنگ‌های آنها دارای ماهیت نفت‌دوستی است به‌خصوص مخازن کربناته شکاف‌دار، تزریق شوراب نمی‌تواند گزینه مناسبی جهت بالا بردن راندمان تولید نفت از این مخازن باشد.

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی m.lashkarbolooki@nit.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2023.4680.3110)

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۵-۱۳۳

در این گونه مخازن با آب دوست شدن سنگ مخزن، آشام خودبه‌خودی آب به ماتریس اتفاق خواهد افتاد که در نتیجه می‌تواند منجر به خارج شدن نفت موجود در آن به‌سمت شکاف‌ها و درنهایت افزایش تولید گردد. به‌عبارتی، با ایجاد تغییر در ماهیت سنگ و بهبود ضریب پخش شوندگی با تغییر ترشوندگی از نفت‌دوستی به‌سمت آب دوستی و یا کاهش کشش‌بین‌سطحی می‌توان امکان برداشت نفت را فراهم کرد.

به‌منظور درک درست و انتخاب مناسب سورفکتانت در حین تزریق مواد شیمیایی مختلف، ابتدا باید سازوکارهای مؤثر هر کدام از این مواد در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گیرند. از بین سازوکارهای اثر بخش برای محلول‌های حاوی مواد شیمیایی، کاهش کشش بین سطحی (IFT) میان دو فاز آبی و نفتی و تغییر ترشوندگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با بهبود این دو سازوکار در حین تزریق مواد شیمیایی به مخازن و همچنین بهبود ضریب پخش‌شوندگی، می‌توان نفت به‌دام افتاده در مخزن را به‌سمت چاه تولیدی هدایت کرد. از سوی دیگر، با توجه به افزایش قیمت نفت و رسیدن اکثر مخازن نفتی ایران به نیمه دوم عمر خود، به‌کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت با بازدهی بالا از جمله استفاده از نسل جدید سورفکتانت‌های شیمیایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. امروزه مایعات یونی به‌دلیل خواص مطلوب از جمله کارآیی بالا، عملکرد بهتر در غلظت پایین‌تر و با سازگاری بیشتر با محیط زیست نسبت به سورفکتانت‌های معمول، به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سورفکتانت‌های متعارف و رایج در نظر گرفته شده‌اند. از نظر هزینه نیز، قیمت سورفکتانت‌های بر پایه مایع یونی مشابه قیمت سورفکتانت‌های یونی است [۱]. معمولاً در مرحله ثانویه برداشت نفت به‌منظور حفظ فشار مخزن از تزریق شورآب استفاده می‌شود. به‌دلیل در دسترس و ارزان بودن و همچنین سازگاری با محیط زیست، تزریق شورآب یکی از روش‌های مورد علاقه پژوهش‌گران بوده است به گونه‌ای که در سالیان اخیر، تزریق آب‌هوشمند به‌عنوان یکی از روش‌های ازدیادبرداشت نفت مورد توجه قرار گرفته است. آب هوشمند یا آب مهندسی شده به آبی گفته می‌شود که با تغییر یون‌ها و یا غلظت آنها خاصیت ویژه یافته است. این آب می‌تواند ترشوندگی سنگ کربناته را از حالت نفت‌دوست به‌حالت خنثی و یا آب‌دوست تغییر داده و آشام آب را به شبکه ماتریسی سنگ افزایش دهد [۲-۴]. با این وجود نقش یون‌ها و شوری آب تزریقی و واکنش آن با انواع سورفکتانت‌ها به ویژه مایعات یونی به‌خوبی مشخص نیست. لشکربلوکی و همکاران با بررسی کشش‌بین‌سطحی سه نمونه نفت‌خام و دو مایع‌یونی $[C_8\ mim][Cl]$ و $[C_8\ py][Cl]$ در حضور و عدم حضور نمک $MgCl_2$ با غلظت ppm ۱۵۰۰۰ به این نتیجه رسیدند که اثر هم‌افزایی نمک $MgCl_2$ و مایع‌یونی وابسته به ترکیب نفت و نوع مایع‌یونی است [۵].

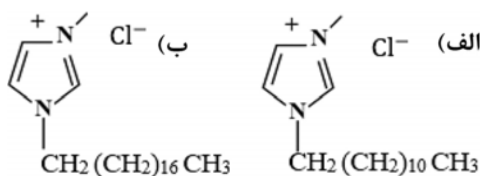
علی زین العابدینی هزاوه و همکاران با مطالعه برروی مایعات یونی بر پایه‌امیدازولیوم و پیریدینیم به نام‌های $[C_8\ py][Cl]$، $[C_{12}\ mim][Cl]$، $[C_8\ mim][Cl]$ و $[Cl][C_{12}\ py]$ برروی کشش‌بین‌سطحی نفت‌خام/ محلول نمکی NaCl و محلول نمکی آب‌سازند به این نتیجه رسیدند که مایع‌یونی $[C_{12}\ mim][Cl]$ بیشترین کاهش کشش‌بین‌سطحی را داشته است و نیز در هر دو خانواده با افزایش زنجیره آلکیل هیدروکربن، کشش‌بین‌سطحی کمتر شده است [۶]. مطالعه چهار نوع مایع یونی $[C_{18}\ mim]]$، $C_{12}\ mim][Cl]$ $[C_8\ py][Cl$، $[[Cl]$ و $[C_{18}\ py][Cl]$ در نمونه آب‌سازند بیانگر این مطلب بود که مایع‌یونی $[C_{18}\ mim][Cl]$ بهترین عملکرد در کاهش کشش‌بین‌سطحی محلول آبی و نفت خام داشته است و سیلاب‌زنی با این مایع‌یونی (در مرحله ثالثیه یا ازدیادبرداشت نفت) در مقایسه با سیلاب‌زنی با شورآب (در مرحله ثانویه) افزایش ۱۳٪ بازیافت نفت را نشان داده است [۷].

اخیراً براری و همکاران در شرایط اتمسفریک با روش اندازه‌گیری کشش‌بین‌سطحی، غلظت بحرانی مایسل (CMC) [1] دو مایع یونی $[C_{12}mim][Cl]$ و $[C_{18}mim][Cl]$ را در حضور نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 مقایسه نموده‌اند [۸]. یکی از موارد مهم در انتخاب سورفکتانت مناسب در فرآیند ازدیادبرداشت نفت هدر رفت آنها به‌علت جذب برروی سطح سنگ است. ازآنجایی‌که سطح سنگ کربناته دارای بار مثبت است [۹] با انتخاب سورفکتانت‌های کاتیونی می‌توان برای این گونه مخازن هدر رفت را کاهش داد. بنابراین در این پژوهش، در ادامه بررسی سیستماتیک بررسی کارآیی مایعات یونی کاتیونی $[C_{12}mim][Cl]$ و $[C_{18}mim][Cl]$، با اندازه‌گیری کشش‌بین‌سطحی و زاویه تماس، کار نیروی چسبندگی، کار نیروی پیوستگی و ضریب پخش شوندگی محاسبه شده است. طراحی آزمایش به این صورت بوده است که با توجه به CMC این دو مایع‌یونی که در پژوهش قبلی به‌دست آمده است [۸]، سه غلظت از مایعات یونی که شامل قبل از نقطه CMC، در نقطه CMC و بعد از نقطه CMC بوده است در حضور نمک‌های NaCl و Na_2SO_4 مورد بررسی قرار گرفته است تا اثر طول زنجیر کاتیونی مایع‌یونی، غلظت آنها و اثر نوع نمک بر تغییر ترشوندگی و ضریب پخش شوندگی مشخص گردد.

بخش آزمایشگاهی

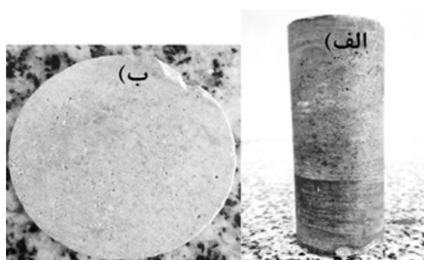
مشخصات مواد

مواد فعال سطحی که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شد، عبارتند از سورفکتانت‌های بر پایه مایع‌یونی از خانواده ایمیدازولیوم به نام‌های ۱-دودسیل-۳-متیل‌ایمیدازولیوم‌کلرید ($[C_{12}mim][Cl]$) و ۱-اکتادسیل-۳- متیل ایمید ازولیوم کلرید ($[C_{18}mim][Cl]$). ساختار این دو مایع یونی از خانواده ایمیدازولیوم با آنیون یکسان کلراید و طول زنجیر کاتیونی متفاوت در شکل ۱ آورده شده است. نمک‌های مورد استفاده NaCl و Na_2SO_4 از شرکت مرک آلمان خریداری شده است. برای بررسی نوع نمک، از محلول‌هایی با قدرت یونی یکسان (۰/۷ M) و نزدیک به‌قدرت یونی آب خلیج فارس) استفاده شده است [۸]. نفتخام استفاده شده در این پژوهش، نفت‌مرده با درجه سنگینی ۳۲ و با ترکیب درصدهای ۴۳/۴، ۴۰/۰، ۱۰/۱ و ۷/۵ به‌ترتیب برای ترکیبات اشباع، آروماتیک، رزین و آسفالتین است.



شکل ۱ الف) ساختار $[C_{12}mim][Cl]$ و ب) ساختار $[C_{18}mim][Cl]$

سنگ استفاده شده نیز، از رخنمون رشته کوه‌های باباکوهی استان فارس تهیه شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است این سنگ ابتدا به شکل مغزه و سپس به‌صورت لایه‌های نازک برش داده شده است. سنگ لایه‌ای برای آزمایش تغییر ترشوندگی به‌کار گرفته شده است.



شکل ۲ الف) عکس مغزه و ب) برش لایه‌ای انجام شده برای انجام آزمایش زاویه تماس

آنالیز سنگ

برای تصویربرداری دقیق از سطح سنگ از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی [2] (FE-SEM) استفاده شده است. برای مشخص کردن درصد عناصر و جنس سنگ نیز از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) که یک روش تحلیلی که برای تجزیه و تحلیل ساختاری، یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه است به‌کار گرفته شده است.

1. Critical Micelle Concentration
2. Field Emission Scanning Electron Microscope

برای مشخص کردن درصد عناصر و جنس سنگ نیز از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) که یک روش تحلیلی که برای تجزیه و تحلیل ساختاری، یا خصوصیات شیمیایی یک نمونه است به‌کار گرفته شده است. چگونگی پراکندگی عناصر و بررسی پروفایل تغییرات غلظت عناصر بین نواحی مختلف نمونه نیز با تصویربرداری با آنالیز نقشه‌ای[1] انجام پذیرفت.

نحوه تهیه مقاطع نازک نفت‌دوست

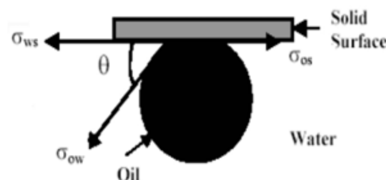
میزان شوری در آب‌های تزریقی، ساختار و جنس سنگ‌مخزن، ترکیبات مختلف موجود در نفت خام، دما و فشار مخزن از مؤثرترین فاکتورها در ترشوندگی مخزن می‌باشند. از میان موارد فوق، ترکیب محلول آبی و جنس سنگ مخزن از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای مثال مخازنی که ساختمان آن‌ها از جنس کلسیت است در مقایسه با نمونه‌های کوارتز، نفت‌دوست‌تر هستند [۱۰-۱۲]. در این پژوهش از مقاطع نازک نفت‌دوست در آزمایشات ترشوندگی استفاده شده است. نوع نفت خام به‌خصوص ترکیبات سنگین و قطبی از جمله آسفالتین نقش ویژه‌ای در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن دارند به همین دلیل برای تهیه سنگ مخزن و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به حالت اولیه (نفت‌دوست) در بیشتر موارد از نفت‌های سنگین با درصد آسفالتین بالا استفاده می شده است. به‌عبارتی، می‌توان با انتخاب نفت سنگین. میزان تغییر ترشوندگی و زمان آن را کاهش داد [۱۳]. علاوه‌بر آن، به‌طور معمول، برای تهیه سنگ‌هایی با ترشوندگی نزدیک به شرایط مخزن با هدف ایجاد تعادل ترمودینامیکی ما بین سنگ، نفت و یون‌های آب سازند، فرآیند پیر شدگی[2] ابتدا با آب سازند (معمولاً با شوری بسیار بالا) و سپس با نفت خام، انجام می شود. ازآنجایی‌که در مطالعات آب هوشمند حضور یون‌ها تأثیر به‌سزایی در عملکرد تغییر ترشوندگی دارد و هدف این پژوهش فقط بررسی تعادل ترمودینامیکی مابین نفت خام، سنگ کربناته با دو نمک NaCl و Na_2SO_4 بوده است فرآیند پیرشدگی با آب سازند انجام نشده است. در این پژوهش، به‌منظور نفت‌دوست کردن مغزه‌ها، ابتدا مقاطع نازک آب دوست (با زاویه تماس حدود °۳۰) درون نمونه نفت غوطه‌ور[3] شده و سپس آن‌ها را درون سیلندر پیستون حاوی نفت خام قرار داده و برای تسریع در فرآیند تغییر ترشوندگی به حالت نفت‌دوست، سیلندر پیستون به‌مدت بیش از دو ماه در درجه حرارت C° ۷۰ و psi ۲۵۰۰ فشار قرار داده شده است. بعد از دو ماه با انجام تست زاویه تماس از نفت‌دوست شدن مقاطع اطمینان حاصل شده است (زاویه تماس حدود °۱۶۰). زمانی‌که نفت روی سطح سنگ قرار می‌گیرد آسفالتین و رزین موجود در نفت برروی سطح سنگ جذب شده و باعث تغییر ترشوندگی سنگ می‌گردند.

اندازه‌گیری IFT و زاویه تماس (CA)

در این پژوهش برای بررسی تغییر ترشوندگی از روش مستقیم اندازه‌گیری زاویه تماس استفاده شده است [۱۳]. دستگاه مورد استفاده شامل سیستم تزریق (شامل سرنگ، سوزن و پمپ تزریق)، منبع نور، محفظه شفاف، جک‌های مختلف برای تنظیم دقیق ارتفاع و جابه‌جایی قطره در تمام جهات، دوربین و نرم‌افزار پردازشگر تصویر با دقت بالا است. به‌طور خلاصه برای اندازه‌گیری IFT، قطره مورد نیاز در نوک نازل قرار داده می‌شود. پس از آن قطره شناسایی و پایش می‌شود. نکته قابل ذکر در مورد قطره تشکیل‌شده این است که اپراتور باید یک قطره مناسب در نوک نازل با حجم کافی ایجاد کند. حجم کافی حجمی است که در آن نیروهای شناوری و گرانش در تعادل قرار دارند و قطره در آستانه جدا شدن از نوک سوزن باشد. به‌منظور انجام یک اندازه‌گیری معتبر و دقیق، هر داده حداقل سه بار تکرار شده است و متوسط آن گزارش شده است.

1. Mapping
2. Aging
3. Soak

ترشوندگی به‌صورت تمایل سیالات جهت خیس‌کردن سطوح جامد در حضور سیالات امتزاج‌ناپذیر تعریف می‌شود. گستره‌ی ترشوندگی در سطوح سنگ‌مخزن شامل حالت‌های نفت‌دوست تا آب‌دوست است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است زاویه تماس با قرار دادن یک قطره نفت خام از پایین برروی سطح سنگ که در محیط آبی شامل سورفکتانت و نمک است در فشار اتمسفری و دمای اتاق (تقریباً ۲۵ °C) اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳ شماتیک نیروهای وارد بر سطح

همان‌گونه که ذکر شد زاویه تماس بین قطره نفت و سطح سنگ در لحظه صفر که سنگ به‌شدت نفت‌دوست است، برابر با °۱۶۰ اندازه‌گیری شده است. بنابراین برای بررسی عملکرد یون‌های مختلف و مایعات یونی، زاویه تماس در زمان مختلفی که سنگ در تماس با محلول‌های آبی قرار گرفته شده است اندازه‌گیری شده است. داده‌های تعادلی زاویه تماس برای محاسبه ضریب پخش شوندگی استفاده شده است.

ضریب پخش‌شوندگی[1]

کار چسبندگی[2] و پیوستگی[3] به‌ترتیب به جداشدن ماده در یک سیستم غیرهمگن و همگن اشاره دارد [۱۴]. در واقع کار پیوستگی در مفهوم انرژی آزاد سطح می‌باشد و همان انرژی است که یک ماده برای تشکیل سطح جدید باید صرف کند و از نظر کمی دو برابر کشش بین سطحی فاز آبی و فاز نفتی (γ_{cb}) می‌باشد [۱۵] که در رابطه ۱ بیان شده است.

$$W_C = 2\gamma_{cb} \quad (۱)$$

کار چسبندگی کاری است که باید برای جداسازی دو فاز مجاور در فصل‌مشترک سیال/ جامد از یکدیگر صرف شود که توسط زاویه تماس در رابطه یانگ-دوپرِ طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$W_A = \gamma_{cb}\left(1+\cos(\theta)\right) \quad (۲)$$

اختلاف کار این دو نیرو معرف ضریب پخش‌شوندگی است که طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$S_C = W_A - W_C \quad (۳)$$

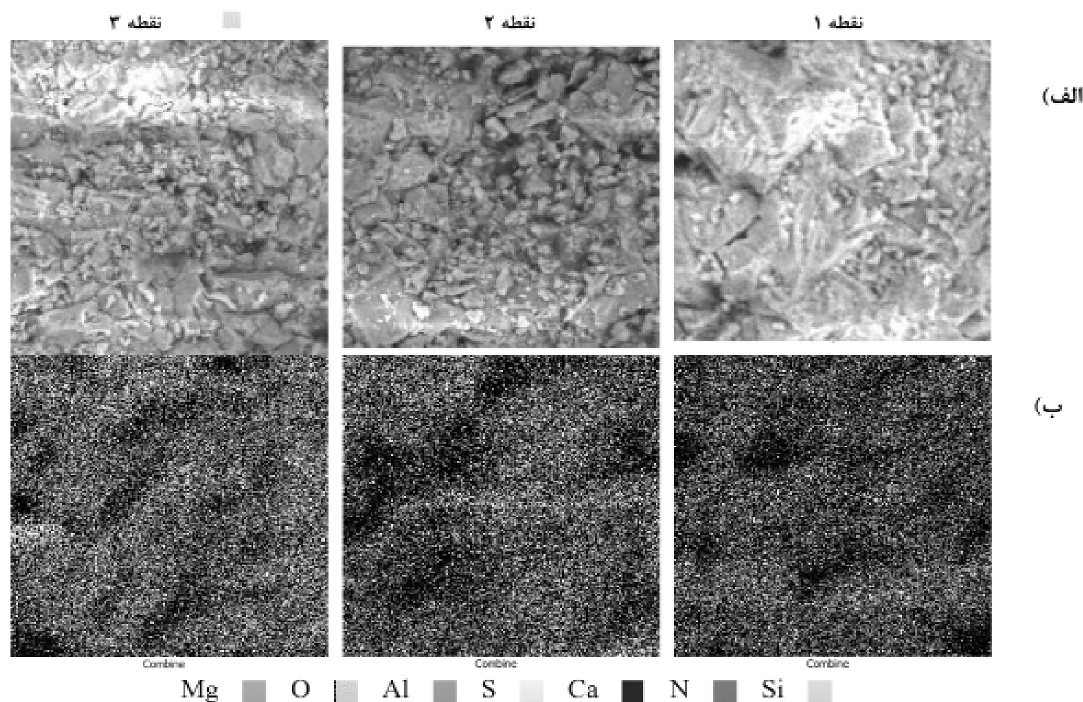
همان‌گونه که از روابط ۱ تا ۳ مشخص است ضریب پخش شوندگی یک مشخصه کمی است که برای محاسبه آن نیاز به اندازه‌گیری کشش‌بین‌سطحی و زاویه تماس است [۱۷].

بحث و نتایج

مشخص‌کردن نوع سنگ

برای تعیین جنس سنگ و یکنواختی درصد عناصر تشکیل‌دهنده آن، از سه نقطه مختلف مقطع نازک سنگ مورد آزمایش، آزمایش‌های EDX-dot map-ping و Fe-SEM گرفته شده است و نتایج در شکل ۴ و جدول ۱ آورده شده است. کلسیت ($CaCO_3$) یک کانی کربناته و پایدارترین کربنات کلسیم است که از کلسیم، کربن و اکسیژن تشکیل شده است. آراگونیت یکی از دو گونه معمول بلورهای کربنات کلسیم و گونه دیگر کانی کلسیت است که دارای ساختار بلوری متفاوت نسبت به کلسیت است. دولومیت ($CaMg(CO_3)_2$) که دارای نرخ استوکیومتری در مقادیر نسبتاً مساوی کلسیم و منیزیم است بیشتر بر اثر فرآیند جایگزینی منیزیم در آهک یا سنگ‌آهک پیش از سنگ‌شدگی[4] تشکیل می‌شود. عناصر تشکیل‌دهنده دولومیت (یا سنگ آهک دولومیتی) عمدتاً آهک (CaO) و اکسید منیزیم (MgO) است ولی ممکن است عناصر دیگری چون اکسیدهای پتاسیم، آهن و سدیم نیز در ساختمان آنها یافت شود.

1. Spreading Coefficient
2. Adhesion Work
3. Cohesion Work
4. Lithification



شکل ۴ تصاویر Fe-SEM شکل الف) و Map شکل ب) از نمونه سنگ مورد استفاده

جدول ۱ نتیجه آنالیز EDX از نمونه مقاطع‌نازک آب‌دوست

اتم		C	N	O	Mg	Al	Si	S	Ca
آب‌دوست	نقطه۱	۱۹/۱۴	۵/۲۶	۵۸/۱۵	۷/۶۱	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۶	۹/۳۷
	نقطه۲	۱۶/۰۷	۳/۴۷	۴۷/۶۶	۹/۲۴	۱/۸۱	۷/۸۰	۰/۲۳	۱۳/۷۲
	نقطه۳	۱۳/۱۵	۲/۱۹	۴۴/۷۵	۱۱/۲۳	۰/۵۱	۲/۵۱	۰/۲۲	۲۵/۴۴

با توجه به نتایج حاصل از آنالیزهای EDX نمونه سنگ، بخش عمده سنگ از اکسیژن، کربن، کلسیم و منیزیم تشکیل شده است که نشان‌دهنده دولومیتی بودن سنگ مورد آزمایش است. علاوه‌بر آن، می‌توان مشاهده کرد که توزیع عنصری و پیکربندی آن در سطح سنگ یکسان نیست که می‌تواند منجر به خطا در آزمون‌های زاویه تماس گردد. برای کاهش درصد خطا، هر آزمون زاویه تماس در حداقل چهار نقطه مختلف سنگ گرفته شده و میانگین آنها همراه با انحراف معیار داده‌ها گزارش شده است.

کشش‌بین‌سطحی

همان‌گونه که در بخش مقدمه بیان شد هدف از این پژوهش بررسی نیروهای سطحی در حضور غلظت‌های مختلف از مایعات‌یونی است. با توجه به CMC گزارش شده برای این دو مایع‌یونی [۷]، کشش‌بین‌سطحی محلول‌های مورد بررسی در غلظت‌های (C) برابر با CMC و کمتر و بیشتر از CMC، در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود کشش بین سطحی مایعات یونی تحت تأثیر نوع نمک قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه حلالیت بسیار پایین مایع یونی $[C_{18}mim][Cl]$ در محلول نمکی است که باعث شد حداکثر غلظت مورد بررسی این مایع یونی (ppm ۵۰۰) به مراتب کمتر از مایع یونی $[C_{12}mim][Cl]$ (۱۰۰۰ ppm) انتخاب گردد. همان‌گونه که در جدول ۲ آورده شده است برای مایع یونی با طول زنجیره کوتاه‌تر ($[C_{12}mim][Cl]$) نمک NaCl عملکرد بهتری در کاهش کشش‌بین‌سطحی از خود نشان داده است.

جدول ۲ کشش‌بین‌سطحی نفت خام و محلول‌های حاوی [C_{12} mim][Cl]

نمک	CMC (ppm)	IFT (mN/m)		
		C<CMC (۲۰۰ ppm)	C=CMC	C>CMC (۱۰۰۰ ppm)
NaCl	۲۷۳	۱/۳	۰/۶	۰/۶
Na_2SO_4	۵۲۴	۴/۱	۱/۷	۱/۴

جدول ۳ کشش‌بین‌سطحی نفت خام و محلول‌های حاوی [C_{18} mim][Cl]

نمک	CMC (ppm)	IFT (mN/m)		
		C<CMC (۲۰۰ ppm)	C=CMC	C>CMC (۵۰۰ ppm)
NaCl	۲۸۹	۱۳/۷	۴/۷	۴/۰
Na_2SO_4	۴۱۷	۶/۵	۲/۲	۱/۵

درصورتی‌که مایع یونی با طول زنجیر بزرگ‌تر ([C_{18}mim][Cl]) در حضور Na_2SO_4 اثر مطلوب‌تری داشته است (جدول ۳). کمترین کشش‌بین‌سطحی و بالاترین فعالیت سطحی در دمای اتاق (۲۵ °C) برای محلول [C_{12}mim][Cl]/NaCl با IFT برابر mN/m ۰/۶ در غلظت‌های بیشتر از CMC (۲۷۳ ppm و بیشتر) به‌دست آمده است. ساکتیول و همکاران [۱۸] برای بررسی اثر مایعات یونی خانواده امیدازولیوم و لاکتام بر کشش بین سطحی نفت خام/محلولی با شوری بالا، سورفکتنت سدیم-دودسیل‌سولفات (SDS) و مایعات یونی ۱-بوتیل-۳-متیل امیدازولیوم کلرید ([C4 mim][Cl])، ۱-بوتیل-۳-متیل امیدازولیوم هگزافلوئوروفسفات ([C4 mim] [PF6])، ۱-هگزیل-۳-متیل امیدازولیوم هیدروژن سولفات ([C6 mim][HSO_4])، ۱-اکتیل-۳-متیل امیدازولیوم کلرید ([C8 mim][Cl])، کپرولاکتام هگزانوئیت ([CP][C6H11COO]) و بوتیرولاکتام هگزانوئیت ([BT][C6H11COO]) را در محلول نمکی NaCl مورد بررسی قرار دادند؛ و به این نتیجه رسیدند که مایعات‌یونی مخصوصاً از خانواده امیدازولیوم کشش‌بین‌سطحی نفت/آب را به مراتب بیشتر از SDS تحت شرایط شوری بالا کاهش می‌دهند. علاوه‌بر این، مشاهده شد که مایعات یونی با طول زنجیره آلکیل بزرگ‌تر تأثیر بهتری برروی کاهش کشش بین سطحی نفت خام/آب داشته‌اند. کاهش کشش بین سطحی بیشتر مشاهده شده در این پژوهش نسبت به پژوهش سیوابالان و همکاران را می‌توان به استفاده از مایع یونی از خانواده امیدازولیوم با طول زنجیره آلکیل بزرگ‌تر نسبت داد.

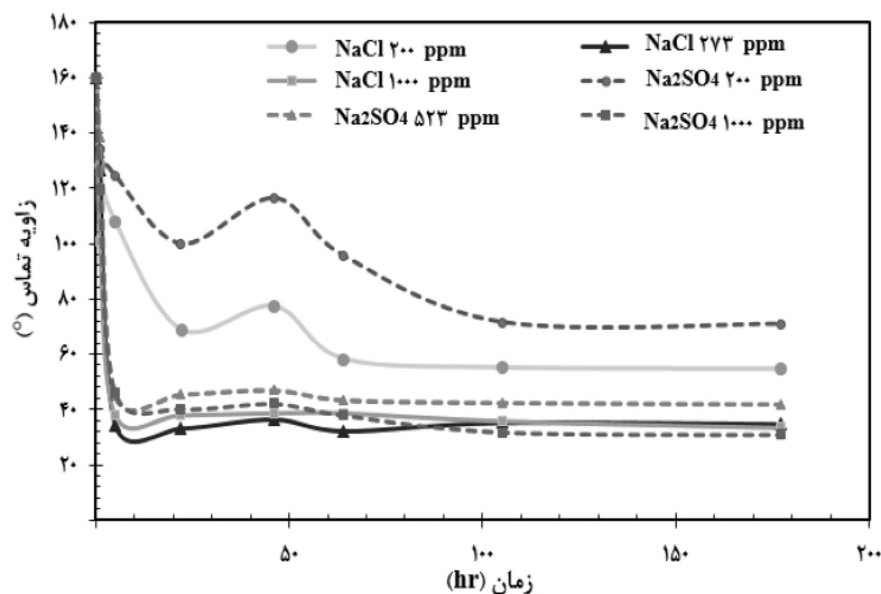
بررسی تغییرات ترشوندگی

پس از بررسی IFT و CMC محلول‌های آبی مورد آزمایش، محلول‌های مورد نظر در غلظت‌های CMC و کمتر و بیش تر از آن آماده شده و سنگ‌های نفت‌دوست برای بررسی تغییرات ترشوندگی در آن‌ها غوطه‌ور شده است. نتایج زاویه تماس در حضور دو نمک NaCl و Na_2SO_4 در دو بخش مجزا برای دو مایع‌یونی مورد بررسی آورده شده است.

الف) [C_{12} mim][Cl]

تغییرات ترشوندگی نمونه سنگ با محلول‌های شامل غلظت‌های مختلف [C_{12} mim][Cl] در حضور نمک NaCl و Na_2SO_4 در شکل ۵ نشان داده شد. در جدول ۴ نیز انحراف معیار زاویه تماس همراه با عکس قطره در حالت تعادل (پس از ۱۷۷ h) آورده شده است. انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان‌دهنده آن است که داده‌ها به‌طور میانگین چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. انحراف معیار نزدیک به‌صفر باشد بیانگر پراکندگی اندک و نزدیکی داده‌ها به میانگین است درحالی‌که انحراف معیار بزرگ نشان‌دهنده پراکندگی قابل توجه داده‌ها است.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۴۵-۱۳۳



شکل ۵ تغییرات ترشوندگی نمونه سنگ با محلول‌های حاوی $[C_{12}$ mim][Cl]

جدول ۴ داده‌های اندازه‌گیری شده از CA تعادلی محلول نمکی شامل [C12 mim][Cl]

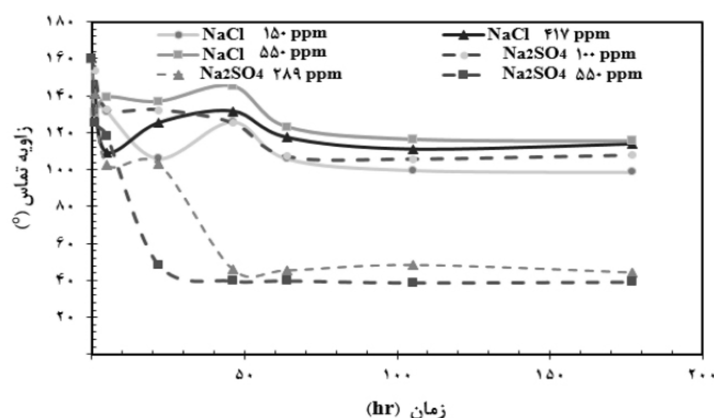
زمان (h)	$[NaCl / [C_{12}$ mim][Cl]			$[Na_2SO_4 / [C_{12}$ mim][Cl]		
	C<CMC	C=CMC	C>CMC	C<CMC	C=CMC	C>CMC
۰	۴ ۱۶۰					
۱	۱۲۸±۳	۱۲۶±۴	۱۰۰±۷	۱۳۴±۶	۱۳۸±۵	۱۱۹±۳
۵	۱۰۷±۵	۳۴±۳	۳۷±۴	۱۲۴±۵	۴۵±۵	۴۵±۳
۲۲	۶۸±۴	۳۳±۲	۳۸±۵	۹۹±۴	۴۵±۴	۴۰±۶
۴۶	۷۷±۲	۳۶±۳	۳۸±۲	۱۱۳±۷	۴۶±۵	۴۲±۴
۶۴	۵۸±۳	۳۳±۲	۳۸±۳	۹۵±۵	۴۳±۵	۳۷±۴
۱۰۵	۵۵±۱	۳۵±۳	۳۵±۲	۷۱±۵	۴۲±۳	۳۱±۳
۱۷۷	۵۴±۲	۳۴±۴	۳۳±۵	۷۰±۵	۴۱±۴	۳۰±۳
شکل تعادلی						

با توجه به اینکه انحراف‌های معیار گزارش شده در جدول ۴ به مراتب کمتر از تغییرات ایجاد شده در زاویه تماس است می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات زاویه تماس قابل اعتماد و صحیح بوده است. زاویه تماس اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف که در شکل ۴ آورده شده است نشان می‌دهد که در غلظت‌های پایین‌تر از CMC تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین عملکرد NaCl و Na_2SO_4 وجود دارد درصورتی‌که افزایش غلظت $[C_{12}$mim][Cl] به غلظت CMC و بیشتر از آن تأثیر نمک کاهش یافته است و این مایع یونی توانسته است زاویه تماس را از حالت شدیداً نفت‌دوست به‌حالت شدید آب دوست تغییر دهد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که اهمیت غلظت سورفکتانت $[C_{12}$mim][Cl] بیشتر از نوع نمک بوده است. با توجه به جدول ۴ و شکل ۵ می‌توان بیان کرد که کاهش IFT تأثیر مثبتی بر تغییرات ترشوندگی

داشته است به‌طوری‌که بدترین عملکرد برای محلول با مقدار IFT بالاتر مشاهده شد. در غلظت‌های کمتر از نقطه CMC عملکرد مایع یونی در حضور NaCl بهتر از Na_2SO_4 بوده است که می‌توان آن‌را به کشش بین سطحی پایین‌تر این محلول نسبت داد. ازآنجایی‌که بخش کاتیونی دونمک مشابه است بنابراین می‌توان این تغییرات را به تفاوت میان آنیون‌های Cl^- و SO_4^{2-} نسبت داد. این تغییرات نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی آنیون Cl^- و $[C_{12}mim][Cl]$ در کاهش کشش بین سطحی و در نهایت زاویه تماس است.

ب) $[C_{18}mim][Cl]$

به‌طور مشابه آزمایشات برای غلظت‌های مختلف $[C_{18}mim][Cl]$ در حضور نمک NaCl و Na_2SO_4 انجام شد و نتایج در شکل ۶ و جدول ۵ آورده شده است. برخلاف مایع یونی $[C_{12}mim][Cl]$ مایع یونی $[C_{18}mim][Cl]$ عملکرد مناسب تری را در حضور نمک Na_2SO_4 نشان داده است. نتایج جدول ۲ (کشش‌بین‌سطحی) و شکل ۶ (زاویه تماس) نشان می‌دهد کاهش کشش‌بین‌سطحی عملکرد محلول در تغییر ترشوندگی را بهبود داده است به گونه‌ای که محلول‌هایی که کمترین کشش بین سطحی را داشته‌اند بیشترین تغییر ترشوندگی را ایجاد نموده‌اند (Na_2SO_4 با غلظت برابر و بالاتر از CMC).



شکل ۶ تغییرات ترشوندگی نمونه سنگ با محلول‌های حاوی $[C_{18}\,mim][Cl]$

جدول ۵ داده‌های اندازه‌گیری شده از CA تعادلی محلول نمکی شامل $[C_{18}\,mim][Cl]$

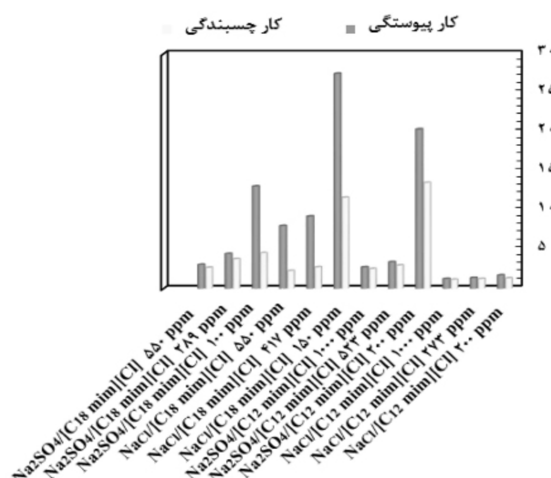
زمان (h)	$Na_2SO_4/[C_{18}mim][Cl]$			$NaCl/[C_{18}\,mim][Cl]$		
	C>CMC	C=CMC	C<CMC	C>CMC	C=CMC	C<CMC
۰	۱۶۰±۴					
۱	۱۲۵±۵	۴۱۴±۵	۱۵۳±۷	۱۳۰±۴	۱۴۱±۷	۱۳۹۵
۵	۱۱۸±۵	۱۰۲±۷	۱۳۲±۴	۱۳۹±۴	۱۰۹±۵	۱۳۱±۴
۲۲	۴۸±۴	۱۰۳±۴	۱۳۲±۷	۱۳۶±۴	۱۲۵±۴	۱۰۵±۸
۴۶	۳۹±۳	۴۶±۴	۱۲۵±۴	۱۴۵±۵	۱۳۱±۸	۱۲۵±۷
۶۴	۳۹±۴	۴۵±۴	۱۰۷±۴	۱۲۳±۴	۱۱۷±۵	۱۰۵±۲
۱۰۵	۳۸±۳	۴۸±۵	۱۰۵±۷	۱۱۶±۵	۱۱۱±۷	۹۹±۴
۱۷۷	۳۹±۴	۴۴±۳	۱۰۷±۳	۱۱۵±۴	۱۱۳±۲	۹۸±۴
شکل تعادلی						

از سویی دیگر، از آنجایی‌که سطح سنگ کربناته دارای بار مثبت است [۹]، وجود آنیون سولفات در محلول می‌تواند منجر به کاهش بار مثبت سطحی و در نتیجه منجر به کاهش تعامل الکترواستاتیک و افزایش میل‌ترکیبی حلقه‌های سرگروه ایمیدازولیوم مایع‌یونی با آسفالتین و رزین چسبیده سنگ می‌گردد. این پدیده در نهایت منجر به برداشتن آسفالتین و رزین از سطح سنگ و تغییر ترشوندگی به‌حالت آب‌دوست می‌شود. به‌عبارت دیگر، مقدار کم IFT بین مایع آبی حاوی سورفکتانت و نفت‌خام و همچنین کاهش تعامل الکترواستاتیک بین اجزای قطبی نفت‌خام و سطح سنگ، ترشوندگی را به‌سمت آب‌دوست تغییر می‌دهند. با توجه به قانون یانگ رابطه ۴ و داده‌های آزمایشگاهی زاویه تماس (θ) و کشش بین‌سطحی بین نفت خام و محلول آبی (γ_{ob})، می‌توان به اهمیت ویژه آن نسبت به کشش بین سطحی محلول آبی و سنگ (γ_{bs}) و کشش بین سطحی نفت خام و سنگ (γ_{os}) پی برد به گونه‌ای که کاهش کشش بین سطحی سیال/سیال باعث تغییر ترشوندگی سنگ کربناته به‌سمت آب‌دوستی شده است.

$$\gamma_{os} = \gamma_{bs} + \gamma_{ob} \cos(\theta) \quad (۴)$$

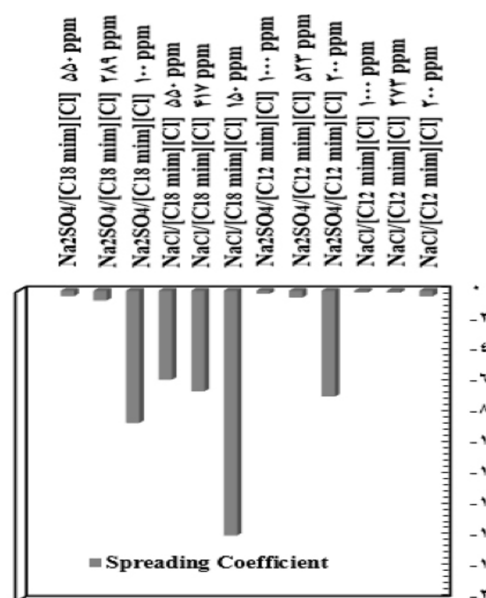
کار چسبندگی و پیوستگی

مقادیر کار پیوستگی و کار چسبندگی برای محلول‌های مورد نظر در شکل ۷ نشان داده شد. کارهای پیوستگی و چسبندگی با کاهش کشش‌بین‌سطحی کاهش می‌یابد درصورتی‌که هرچه زاویه تماس تعادلی به مقادیر کمتری میل کند (حالت آب‌دوست)، کار چسبندگی افزایش می‌یابد و باعث نزدیک شدن ضریب پخش شوندگی به‌سمت صفر می‌گردد. به‌طور کلی، طول دم مایع‌یونی (بخش کاتیونی) به‌شدت بر فعل و انفعالات اتصال و خاصیت آب‌گریزی آن تأثیرگذار است. در صورت عدم وجود یون در محلول، با افزایش طول زنجیره مایعات یونی خواص سطحی (کشش‌بین‌سطحی) بهبود می‌یابد [۱۹]. درصورتی‌که در این پژوهش چنین نتیجه‌ای در حضور نمک به‌دست نیامده است. در کل، برهم‌کنش‌های آبگریز و الکترواستاتیک به گرده‌همایی سورفکتانت و چیدمان آن‌ها در فصل‌مشترک بسیار وابسته به نوع نمک است به گونه‌ای که در یک نمونه ممکن است که اثر متقابل الکترواستاتیک تأثیرگذاری بیشتری داشته باشد درصورتی‌که در یک مورد دیگر، برهم‌کنش‌های آبگریز تأثیر غالب را داشته باشد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این موضوع است که تأثیر این برهم‌کنش‌ها بر IFT نفت‌خام و در نتیجه تغییر ترشوندگی و کار نیروهای چسبندگی و پیوستگی وابسته به نوع نمک و طول زنجیره آلکیل مایع‌یونی دارد. با توجه به شکل ۶ مشخص است



شکل ۷ محاسبه مقادیر کار پیوستگی و کار چسبندگی برای محلول شورآب شامل $[C_{12}$ mim][Cl] و $[C_{18}$ mim][Cl]

که کار چسبندگی و پیوستگی مایع یونی [C_{12} mim][Cl] در حضور نمک NaCl به مراتب بهتر از مایع یونی [C_{18} mim][Cl] بوده است که دلیل آن کشش‌بین‌سطحی پایین و تغییر ترشوندگی به‌سمت آب‌دوست است. ضریب پخش شوندگی برای درک بهتر عملکرد محلول‌های مورد آزمایش، مقادیر ضریب پخش شوندگی نمونه سنگ توسط اختلاف بین کار چسبندگی و کار پیوستگی محاسبه شده است و نتایج در شکل ۸ نشان داده شد.



شکل ۸ محاسبه ضریب پخش شوندگی نمونه سنگ محلول شورآب شامل [C_{12} mim][Cl] و [C_{18} mim][Cl]

به‌علت آنکه این پارامتر هم‌زمان عملکرد کاهش کشش‌بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی را در نظر می‌گیرد معیار مناسبی برای مقایسه عملکرد سورفکتانت‌ها است. بهترین عملکرد برای حالتی به‌دست می‌آید که این ضریب به‌سمت صفر میل کند. نتایج ضریب پخش شوندگی نشان می‌دهد که بهترین عملکرد برای مایع‌یونی با طول زنجیر کوتاه تر ([C_{12}mim][Cl]) با غلظت ۱۰۰۰ ppm در حضور نمک NaCl به‌دست آمده است. در فرآیند آب هوشمند، NaCl به‌عنوان نمک غیرفعال (نمکی با کارآیی منفی و یا بی‌اثر در فرآیند تغییر ترشوندگی) در برهم‌کنش‌های مابین فازهای آبی و نفتی و سطح سنگ شناخته می‌شود؛ از این رو، پیشنهاد می‌شود که آب دریا باید با حذف این نمک برای دست‌یابی به تغییر ترشوندگی مناسب، اصلاح شود [۲۰]. درصورتی‌که در حضور مایع‌یونی چنین پدیده‌ای مشاهده نشده است. رفتار متناقض ILها در درجه اول به برهم‌کنش‌های بین مولکولی شامل نیروی دافعه الکترواستاتیک، نیروی جاذبه واندروالس و برهم‌کنش‌های آبگریز تعیین می‌شود. در کنار این برهم‌کنش‌ها، تغییر ترشوندگی سطح سنگ کربناته را می‌توان به چگالی بار سطح جامد و گروه‌های عاملی متصل به سطح سنگ نیز نسبت داد. تغییرات ترشوندگی سنگ کربناته در حضور [C_{12} mim][Cl]/NaCl از حدود °۱۶۰ به °۳۴ در مقایسه با [C_{18} mim][Cl]/NaCl از حدود °۱۶۰ به °۱۳۴ قابل توجه است. به‌دلیل بهبود جانمایی و ساختار تنگ چین (فشرده) [۱] مایع یونی با زنجیره آلکیل کوتاه‌تر در حضور نمک NaCl بهترین عملکرد در بین محلول‌های مورد آزمایش برای ترکیب [C_{12} mim][Cl]/NaCl با کشش‌بین‌سطحی برابر با ۰/۶ mN/m به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بررسی اثر نوع یون‌های موجود در فاز آبی بر کارآیی مایعات یونی از خانواده امیدازولیوم با طول زنجیره کاتیونی متفاوت در بهبود کاهش کشش‌بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی با محاسبه کار چسبندگی و پیوستگی و ضریب پخش شوندگی نتایج ذیل حاصل شده است:

نتایج حاصل از آنالیزهای EDX-dot mapping و Fe-SEM برروی نمونه سنگ نشان داد بخش عمده سنگ از اکسیژن، کربن، کلسیم و منیزیم تشکیل شده است که نشان‌دهنده دولومیتی بودن سنگ مورد آزمایش است. علاوه‌بر آن مشاهده شد که

1. Closed Packed Structure

توزیع عنصری و پیکربندی آن در سطح سنگ یکسان نیست که می‌تواند یکی از دلایل رفتار متناقض گزارش شده در پژوهش‌های انجام شده در فرآیند تزریق آب هوشمند باشد. کاهش کشش‌بین‌سطحی نفت خام و محلول آبی عملکرد محلول در تغییر ترشوندگی را بهبود داده است به گونه‌ای که محلول‌هایی که کمترین کشش بین سطحی را داشته‌اند بیشترین تغییر ترشوندگی را ایجاد نموده‌اند. برای مایع یونی با طول زنجیره کوتاه‌تر ([C_{12}mim][Cl]) نمک NaCl عملکرد بهتری در کاهش کشش‌بین‌سطحی از خود نشان داده است درصورتی‌که مایع یونی با طول زنجیر بزرگ‌تر ([C_{18}mim][Cl]) در حضور Na_2SO_4 اثر مطلوب‌تری داشته است. کمترین کشش‌بین‌سطحی و بالاترین فعالیت سطحی برای محلول [C_{12}mim][Cl]/NaCl با IFT برابر ۰/۶ mN/m در غلظت‌های بالاتر از CMC به‌دست آمده است که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی آنیون Cl^- و [C_{12}mim][Cl] در کاهش کشش بین سطحی و در نهایت کاهش زاویه تماس است. برای بهبود ضریب پخش شوندگی به شرایط مطلوب و ضرایب پخش شوندگی نزدیک به‌صفر، اهمیت غلظت سورفکتانت بیشتر از نوع نمک بوده است. بهترین عملکرد در بهبود ضریب پخش شوندگی بین محلول‌های مورد آزمایش برای ترکیب [C_{12} mim][Cl]/NaCl به‌دست آمده است.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با استفاده از گرنت اعطایی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره BNUT/393055/98 انجام شده است.

مراجع

[1]. Zante G, Boltoeva M, Masmoudi A, Barillon R, Trébouet D (2021) Supported ionic liquid and polymer inclusion membranes for metal separation. Separation & Purification Reviews, 51.1:100-116.

[۲]. احمدی ص، وفایی سفتی م، بهرامیان ع، رستگار س ا، جراحیان خ (۱۳۹۴) بهینه‌سازی و مدل‌سازی زاویه تماس با استفاده از روش سطح پاسخ در فرآیند تغییر ترشوندگی سنگ کربناته توسط آب هوشمند، پژوهش نفت، ۲۵، ۸۳: ۱۵۹-۱۷۰.

[۳]. منتظری م، شهرآبادی ع، نورعلیشاهی ع، موسویان م ع، حلاج ثانی ا (۱۳۹۷) بررسی پدیده تغییر ترشوندگی در فرآیند تزریق آب هوشمند به مخازن کربناته با استفاده از آزمایش پتانسیل زتا و زاویه تماس، پژوهش نفت، ۲۸، ۴-۹۷: ۲۹-۳۹.

[۴]. محمدی م، ریاحی س (۱۳۹۸) بررسی عملکرد و سازگاری نمونه آب‌های هوشمند حاوی بازدارنده‌های رسوب در مخازن کربناته، پژوهش نفت، ۲۹، ۶-۹۸: ۴-۲۳.

[5]. Lashkarbolooki M. Ayatollahi S (2018) Investigation of ionic liquids based on pyridinium and imidazolium as interfacial tension reducer of crude Oil– Water and their synergism with MgCl2. Journal of Petroleum Science and Engineering. 171: 411:424, DOI:10.1016/j.petrol.2018.07.062.

[6]. Hezave AZ. Dorostkar S. Ayatollahi S. Nabipour M. Hemmateenejad B (2013) Effect of different families (imidazolium and pyridinium) of ionic liquids-based surfactants on interfacial tension of water/crude oil system. Fluid Phase Equilibria. 360: 139-145, DOI:10.1016/j.fluid.2013.09.025.

[7]. Manshad AK Rezaei M Moradi S Nowrouzi I Mohammadi AH (2017) Wettability alteration and interfacial tension (IFT) reduction in enhanced oil recovery (EOR) process by ionic liquid flooding. Journal of Molecular Liquids. 248: 153-162, DOI:10.1016/j.molliq.2017.10.009.

[8]. Barari M. Lashkarbolooki M. Abedini R (2021) Interfacial properties of crude oil/imidazolium based ionic liquids in the presence of NaCl and Na2SO4 during EOR process. Journal of Molecular Liquids. 327: 114845, DOI:10.1016/j.molliq.2020.114845.

[9]. Hiorth A, Cathles LM, Madland MV (2010) The impact of pore water chemistry on carbonate surface charge

and oil wettability. Transport in Porous Media. 85.1: 1-21, DOI:10.1007/s11242-010-9543-6.

[10]. Standnes DC (2001) Enhanced Oil Recovery from Oil-Wet Carbonate Rock by Spontaneous Imbibition of Aqueous Surfactant Solutions, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology.

[11]. Tie H (2006), Oil recovery by spontaneous imbibition and viscous displacement from mixed-wet carbonates. University of Wyoming.

[12]. Nair R (2014) Smart water for eor by membranes (Master›s thesis), University of Stavanger, Norway.

[13]. Anderson WG (1986) Wettability literature survey-part 1: rock/oil/brine interactions and the effects of core handling on wettability. Journal of Petroleum Technology. 38(10): 1125-1144.

[14]. Tan Y. Guo M (2013) Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic. Construction and Building Materials. 47: 254-260.

[15]. Lamperti R. Grenfell J. Sangiorgi C. Lantieri C. Airey GD (2015) Influence of waxes on adhesion properties of bituminous binders. Construction and Building Materials. 76: 404-412.

[16]. Kakar MR. Hamzah MO. Akhtar MN. Woodward D (2016) Surface free energy and moisture susceptibility evaluation of asphalt binders modified with surfactant-based chemical additive. Journal of Cleaner Production. 112: 2342-2353.

[17]. Chatzis I. Ayatollahi S (1993) The effect of gas injection rate on the recovery of waterflood residual oil under gravity assisted inert gas injection, Technical Meeting/Petroleum Conference of The South Saskatchewan Section, Petroleum Society of Canada.

[18]. Sakthivel S. Velusamy S. Nair VC. Sharma T. Sangwai JS (2017) Interfacial tension of crude oil-water system with imidazolium and lactam-based ionic liquids and their evaluation for enhanced oil recovery under high saline environment. Fuel. 191: 239-250.

[19]. Zeinolabedini Hezave A. Dorostkar S. Ayatollahi S. Nabipour M. Hemmateenejad B (2014) Mechanistic investigation on dynamic interfacial tension between crude oil and ionic liquid using mass transfer concept. Journal of Dispersion Science and Technology. 35.10: 1483-1491.

[20]. Fathi SJ. Austad T. Strand S. (2010) “Smart water” as a wettability modifier in chalk: the effect of salinity and ionic composition. Energy and Fuels, 24.4: 2514-2519.

پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۷۰-۱۴۶

کاربرد مدل‌های زمین آماری و فرکتالی سرعت-حجم به‌منظور تعیین سرعت‌های لایه‌ای و فشارهای سازندی در یکی از میادین جنوب غرب ایران

پوریا کیانوش[1]، پیمان افضل[1]، قدرت اله محمدی*[1]، ناصر کشاورز فرج خواه[2] و سید علی اکبر حسینی[3]

۱- گروه مهندسی نفت و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۲- گروه پژوهش ژئوفیزیک، پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

چکیده

در روش‌های لرزه‌ای، تخمین فشارهای سازندی با تبدیل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی و همسان‌سازی آن با نگار سرعت و کالیبراسیون نتایج با فشار مؤثر حاصل از آزمایش چاه به‌دست می‌آید. این مطالعه در زمینه مطالعات سرعت در یکی از میادین دشت آبادان واقع در جنوب غربی ایران است که سازندهای هدف عموماً کربناته بوده و به‌جز سازند کژدمی فاقد میان لایه‌های شیل هستند. این مقاله براساس داده‌های ۲۳ حلقه چاه و تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌ای صورت پذیرفته و مدل‌های سرعت فشاری و برشی از مدل‌های زمین آماری ترکیبی، تعیین شده و با مدل‌های فرکتالی ناشی از روش مقدار-حجم به‌خصوص مدل سرعت-حجم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. براساس داده‌های VSP، حداکثر سرعت لایه‌ای در محدوده m/s ۲۹۰۰–۲۷۶۰ در سمت شمال شرق مربوط به سازند گوتنیا است. جهت مطالعات فشار شکست سازند نیز مدل‌سازی مکعب سرعت برشی با استفاده از مغزه‌های چاه اکتشافی و نگار سرعت برشی انجام شده که مکعب نهایی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های تخلخل، لیتولوژی و داده‌های اصلی سرعت برشی DSI تعیین شد. مقادیر نهایی مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق بیشتر میدان اکثراً در محدوده $(m/s)*(g/cm^3)$ ۱۵-۸ هزار است که در محدوده سازندهای آهکی می‌تواند قرار گیرد. براساس محاسبه ماتریس لوگرشیو حاصل از مدل فرکتالی مقدار-حجم، بیشترین میزان تطبیق نهایی در بازه‌های سنگ‌آهک غالب به‌میزان ۰/۷۴ محاسبه شده است. این نشان از تطابق بالای مدل مکعب سرعت فشاری با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ و مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی و نیز مدل‌سازی فرکتالی سرعت-حجم است. همچنین براساس واریوگرام‌های مدل نهایی مکعب سرعت فشاری، میزان سقف واریوگرام و ناهمسان‌گردی در جهت عمودی به‌ترتیب ۰/۳۴ و m ۹۶ و در جهت‌های افقی اصلی و فرعی به‌ترتیب ۰/۹۶ و m ۱۱۸۵۰ است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی سرعت لرزه‌ای، مکعب سرعت فشاری، وارون‌سازی مقاومت صوتی، فشار سازندی، مدل فرکتالی سرعت- حجم

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی gh_mohammadi@azad.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4787.3146)

مقدمه

داشتن درک صحیح از فشار منفذی سازند نه تنها برای حفاری ایمن و اقتصادی چاهها ضروری است، بلکه برای ارزیابی عوامل ریسک اکتشاف چون مهاجرت سیال سازندی و یکپارچگی پوش سنگ نیز حیاتی است. معمولاً قبل از حفاری، تخمین اولیه‌ای از فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سطحی انجام می‌شود. در این روش عمدتاً از سرعت لرزه‌ای استفاده می‌شود. بنابراین، دقت مدل‌های سرعت به‌کار رفته برای تعیین فشار منفذی بیشترین اهمیت را دارد. استفاده از داده‌های لرزه‌ای تنها روشی است که می‌تواند فشار منفذی را در مرحله قبل از حفاری پیش‌بینی کند. در واقع استفاده از روش‌های لرزه‌ای برای تخمین فشار منفذی بر مبنای تأثیرپذیری سرعت امواج از تغییرات فشار است [۱-۴]. روش‌های اصلی این مطالعات شامل مدل‌سازی سرعت جهت تخمین فشار منفذی با استفاده از تلفیق داده‌های لرزه‌نگاری و اطلاعات چاهی و مقایسه دقت و کارایی آن‌ها است [۱ و ۵]. در روش‌های لرزه‌ای تخمین فشار منفذی با تبدیل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی و نهایتاً مقایسه با فشار به‌دست آمده حین آزمایش چاه به‌دست می‌آید و نتایج از مدل‌های زمین آماری یا هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی تعیین می‌شود [۲ و ۴]. در روش باورز[1] با استفاده از رابطه بین سرعت و تنش مؤثر، مکعب تنش مؤثر و رابطه بین چگالی و فشار روباره، مکعب فشار روباره تولید می‌شود. در نتیجه فشار منفذی سازند با توجه به رابطه ترزاقی[2] تخمین زده می‌شود [۲]. نمودار زمان عبور صوت (DT) یکی از مهم‌ترین نمودارهای درون‌چاهی برای برآورد فشار منفذی استکه آن را می‌توان با استفاده از دیگر نمودارها مانند سرعت لایه‌ای VSP، گامای سازند، چگالی، تخلخل و استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی با تقریب قابل قبول تخمین زد و نهایتاً طراحی سیالات حفاری به لحاظ وزن گل و سیمان پشت جداری به‌نحوی‌که در بازه گرادیان فشار سازندی مدل‌سازی شده قرار داشته باشند انجام پذیرد [۸ - ۵]. برای تعیین گرادیان فشار منفذی در یک میدان نیاز به داده‌های لرزه‌ای، نمودارهای درون‌چاهی و اطلاعات حفاری است. در صورت عدم وجود اطلاعات لازم در بخشی از میدان، پس از سرند داده‌های موجود و تهیه بانک اطلاعاتی، با استفاده از مدل‌های تخمین‌گر، نمودارهای لازم تهیه می‌شود [۹ و ۱۰]. یکی از راه‌های کنترل مقادیر نمودار صوتی انطباق آن با مقادیر حاصل از تحلیل سرعت لرزه‌ای است. تئوری ارزیابی کمی فشار درونی زمین با استفاده از ابزار صوتی، مستقل از مقدار تخلخل است. از این رو نمودار صوتی می‌تواند شاخص خوبی از فشار درونی زمین باشد، یعنی افزایش زمان عبور در صوت در لایه‌ها تابعی از تغییر تخلخل یا افزایش گرادیان منفذی است. بنابراین می توان ضمن تشخیص مناطقی که فشار منفذی غیرعادی دارند، ریسک خطر حفاری اکتشافی و هزینه‌های مربوطه در این مناطق را کاهش داد. از آنجا که علاوه‌بر فشار، عوامل دیگری مانند لیتولوژی نیز بر سرعت امواج لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند؛ لذا استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و نگارهای چاه‌پیمایی موجود، می‌تواند تا حد زیادی از بروز خطا در تخمین فشارهای سازند خصوصاً در سازندهای کربناته جلوگیری کند [۱، ۵ و ۱۵-۱۱]. جهت تخمین فشار شکست سازند نیز نیاز به محاسبه سرعت برشی است. تعیین سرعت موج برشی توسط روش‌هایی مانند آنالیز مغزه مستلزم صرف زمان و هزینه گزافی است و همچنین به‌علت نبود مغزه‌های کافی و تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، تعیین این پارامتر توسط روش‌های معمول از دقت چندانی برخوردار ناست. همچنین، روابط تجربی فراوانی نیز در مورد محاسبه سرعت امواج برشی ارائه شده است.

1. Bowers
2. Terzaghi
3. Castagna

که پرکاربردترین آنها روش ارائه شده توسط کاستانیا[1] براساس تغییرات لیتولوژی است [۱۶ و ۱۷]، روش‌های هوشمند یکی از روش‌های جدید، کم هزینه و دقیقی هستند که می‌توانند با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی مانند DSI، سرعت موج برشی مخزن را در کمترین زمان ممکن تخمین بزنند [۱۸]. جهت تخمین فشار منفذی به‌روش باورز با داده‌های سرعت، رابطه بین تنش مؤثر و سرعت در رسوبات تحت فشار نرمال توسط باورز پیشنهاد شده است [۱۹ و ۲۰]:

$$V = V_0 + A\sigma^B \quad (۱)$$

در اینجا، V_0 سرعت رسوبات ناپیوسته اشباع شده و A و B بیانگر تغییرات در سرعت با افزایش تنش مؤثر که از داده‌های چاه به‌دست می‌آیند. تنش مؤثر (σ) را نیز می‌توان از این رابطه تعیین کرد:

$$\sigma = \left[\frac{V - V_0}{A}\right]^{\frac{1}{B}} \quad (۲)$$

به‌منظور محاسبه فشار مؤثر در محدوده مخزن با استفاده از رابطه باورز، ابتدا باید ضرایب رابطه را به دست آورد. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات فشار مؤثر نقاطی از چاه‌ها[2] (MDT/DST) و همچنین مکعب فشار روباره ایجاد شده در بخش قبل می‌توان تنش مؤثر را در نقاطی از این چاه‌ها محاسبه نمود [۲۱-۱۹]. به‌علاوه، مقادیر سرعت صوتی در محل چاه‌ها را می‌توان با استفاده از نگار صوتی موجود به‌دست آورد. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی[3] (SGS) در شبیه‌سازی‌های زمین آماری معمول است و در بسیاری از شبیه‌سازها برروی عیار، تخلخل، تراوایی و متغیرهای ناحیه‌ای دیگر جواب داده است. در این روش مقدار شبیه‌سازی شده در هر نقطه با استفاده از تابع توزیع احتمال محاسبه شده از داده‌های خام و داده‌های شبیه‌سازی قبلی در همسایگی نقطه موردنظر به‌دست می‌آید. این روش با انتخاب تصادفی موقعیت و پیشرفت کار به‌صورت متوالی در طول شبکه به شبیه‌سازی می‌پردازد. اصل نخستین در تمام روش‌های گوسی، نرمال بودن داده خام است در غیر این صورت باید به استاندارد نرمال تبدیل شوند [۲۲ و ۲۳]. همواره یکی از معضلات در اکتشاف کانسارهای معدنی و میادین نفتی و گاز عدم امکان ارزیابی یک یا چند پارامتر کیفی در جز به جز مخزن با روش‌های جاری مانند معکوس فاصله وزن دار[4] (IDW) بوده است، لذا برای ارزیابی پارامترهای کیفی در یک مدل بلوکی با تعداد ریزبلوکهای زیاد می‌توان از روش تخمین‌گر خطی نااریب کریجینگ[5] با کمترین واریانس و خطای ممکن در هر ریزبلوک استفاده کرد. در برخی موارد ممکن است که از یک متغیر به قدر کافی داده موجود نباشد و ارزیابی توزیع آن با مشکل مواجه شود، در این حالت می توان با درنظرگرفتن همبستگی و رابطه فضایی این متغیر نخستین با یک متغیر دوم که دارای تعداد داده‌های مناسبی است با روش زمین آماری کوکریجینگ[6] که تعمیم یافته کریجینگ است، مدل‌سازی را اصلاح نمود. لذا در محل‌هایی که کمبود نمونه در آنها وجود دارد با استفاده از همبستگی میان متغیر ناحیه‌ای موردنظر و نیز متغیر کمکی، ارزیابی صورت می‌گیرد. بولینگ و آرمسترانگ نشان دادند که اگر میزان همبستگی دو متغیر بیش از ۰/۵ باشد، خطای تخمین تا حد بسیاری با این روش کاهش می‌یابد. همچنین کرمی و همکاران نشان دادند که از میان مدل‌های زمین آماری مختلف برای داده‌های یکسان، روش کوکریجینگ دارای بالاترین ضریب همبستگی با حداقل میزان خطای مجاز ۰/۵ است [۲۶-۲۴].

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتالی عمدتاً در تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی و جدایش گوناگون در تمام شاخه‌های علوم زمین و دانش‌های وابسته مانند اکتشاف نفت، معدن و ژئوفیزیک کاربرد دارند.

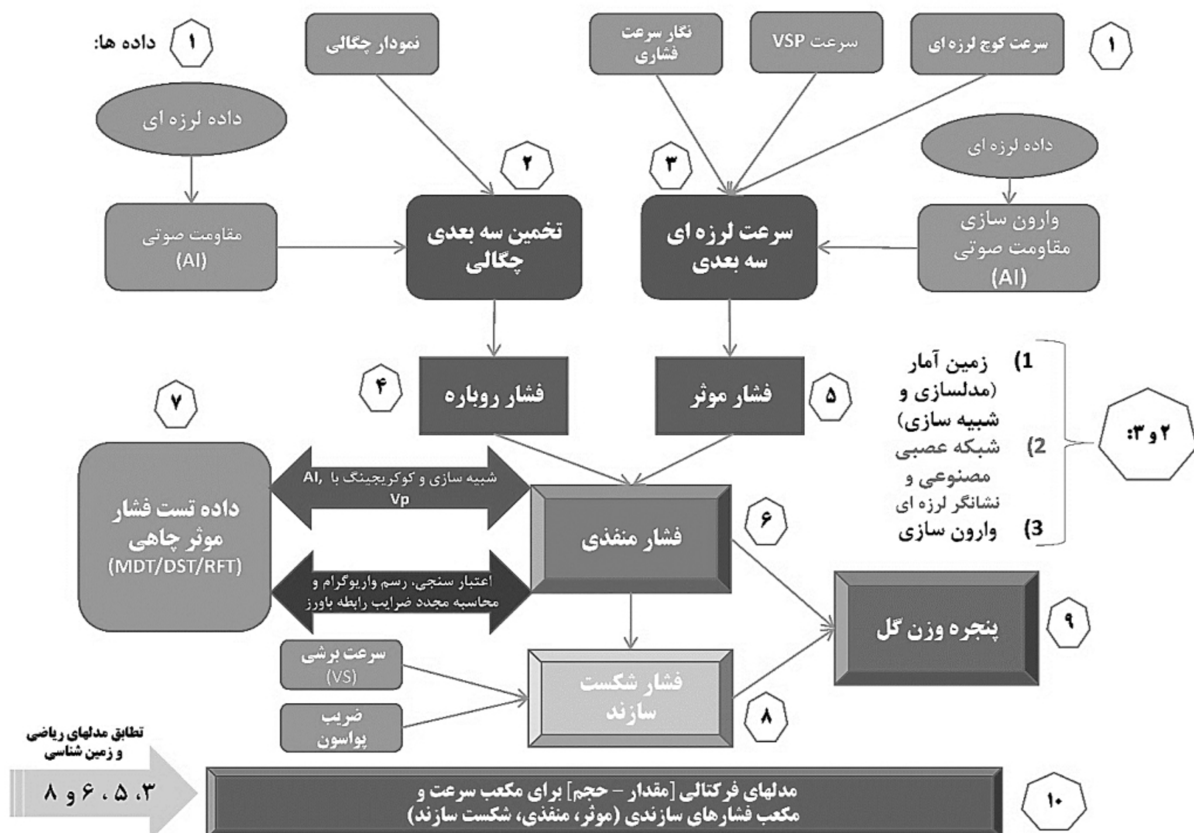
1. Castagna
2. Modular Dynamic Tester (MDT)/Drill Stem Test (DST)
3. Sequential Gaussian Simulation (SGS)
4. Inverse Distance Weighted
5. Kriging Linear Unbiased Estimator
6. Co-Kriging

در این میان روش‌های عیار-مساحت، عیار-محیط، عیار-تعداد و طیف توان-مساحت در علوم زمین کاربرد بیشتری دارند [۲۷ و ۲۸]. ماندلبروت و آگتربرگ روش مقدار-اندازه را به‌منظور تعیین مقادیر آستانه‌ای و زمینه ژئوشیمیایی ارایه کردند [۲۷ و ۲۸]. افضل و همکاران روش مقدار-حجم را نخستین بار برای جدایش زون‌های کانه‌زایی در کانسارهای مس پورفیری ارائه نمودند و در ادامه این روش برای جدایش جوامع در مطالعات ژئوفیزیکی، مکانیک سنگی و اقتصادی انجام شد [۲۹-۳۲]. در منحنی‌های لگاریتمی ناشی از روش‌های فرکتالی هر جا که شیب منحنی تغییر شدیدی نمود یعنی جامعه عوض شده است. این امر نشانگر تغییر شدید مقدار متغیر ناحیه‌ای (سرعت فشاری سازند در این مطالعه) است که تابع تغییر شرایط زمین‌شناسی است. فرمول روش عیار-حجم به شرح زیراست [۳۳-۳۷]:

$$V(\geq \rho) \propto \rho^{-D} \qquad (۳)$$

که در این حالت، V حجم دربرگیرنده عیارهای بزرگتر و مساوی ρ در کانسار مورد مطالعه و D بعد فرکتال است. در این تحقیق چالش جدیدی برای مطالعه سرعت فشاری به‌روش حجم-سرعت انجام شده است [۳۷]. جهت بررسی تطابق بین مدل‌های زمین‌شناسی و ریاضی از ماتریس لوگرشیو[1] استفاده شده است. این ماتریس برای اولین بار توسط کارانزا ارایه و در تطبیق آنومالی‌های طلا ناشی از رسوبات آبراهه‌ای یافت شده با واحدهای سنگی در منطقه آروروی واقع در شمال‌غرب مجمع الجزایر فیلیپین، به کار گرفته شد. برای این‌کار از یک ماتریس ۲ در ۲ استفاده می‌گردد. هر داده‌ای که پس از محاسبات مربوط به ماتریس موردنظر بیشترین همپوشانی را با نتایج حاصل از مدل‌های زمین‌شناسی و ریاضی داشته باشد از دقت بالاتری (OA) برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان نتیجه‌ای قطعی و با کمترین میزان خطا مورد توجه واقع گردد [۳۸]. در محدوده مورد مطالعه واقع در میدان آزادگان جنوبی از مجموع ۴۲ حلقه چاه‌های موجود، ۲۳ حلقه چاه دارای بیشترین اطلاعات انتخاب شده است که تعداد ۱۷ حلقه چاه واقع در بخش مرکزی، غربی و جنوبی آن دارای داده‌های آزمایش فشار مؤثر در سازندهای مخزنی ایلام تا فهلیان به‌صورت ناپیوسته است، اما در بخش‌های کناری میدان این داده‌ها وجود نداشته و برای محاسبه سرعت فشاری و نهایتاً گرادیان فشار منفذی در کل میدان باید این نمودار را برای چاه‌های واقع در بخش‌های کناری تخمین زد. به این منظور با تعیین روابط بین داده‌های موجود مخزن مانند نمودار سرعت فشاری و برشی، چگالی، گاما، تخلخل و اشباع سیال، سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای و مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، مکعب اولیه داده‌ها با روش‌های زمین آماری مانند شبیه‌سازی گوسی متوالی همراه با کوکریجینگ هم مختصات و روش معکوس فاصله اقدام به مدل‌سازی اولیه شده است. هدف کلی از انجام این مطالعات تعیین مدل نهایی پنجره گل حفاری برای انجام حفاری‌های جدید در کل وسعت میدان مورد مطالعه به‌صورت ایمن با بالاترین تطابق ممکن است که طی سه مرحله مطالعات سرعت‌های لایه‌ای، فشارهای سازندی و نهایتاً تعیین محدوده وزن سیال حفاری انجام پذیرفته است که این مقاله حاصل از بخش اول مطالعات است (شکل ۱). در این مقاله جهت ساخت مدل نهایی مکعب سرعت فشاری در کل وسعت میدان آزادگان جنوبی، برای اولین بار از ترکیب روش‌های زمین آماری شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و کوکرجینگ با مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای به‌صورت توأم استفاده شده که پس از انجام تطابق با مدل اولیه حاصل از روش معکوس فاصله وزن‌دار (IDW)، دارای همبستگی بالاتری نسبت به مدل مشابه با استفاده از مدل سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای بوده است.

1. logratio



شکل ۱ روندنمای کلی مراحل اجرای تحقیق شامل مطالعات سرعت لایه‌ای، فشارهای سازندی و پنجره گل حفاری.

همچنین سایر موارد نوآوری تحقیق حاضر عبارت است از استفاده از قابلیت‌های جدید نرم‌افزار پترل جهت برنامه‌نویسی شرطی که شامل عبارات شرطی متوالی و تو در تو جهت تجمیع نگارها و مدل‌ها در یک مدل واحد و حذف مقادیر خارج از محدوده بوده، و نهایتاً استفاده از مدل‌های فرکتالی سرعت فشاری- حجم جهت جدایش رژیم‌های سرعت و انجام تطبیق مدل‌های ریاضی سرعت لایه ای و مدل زمین‌شناسی به‌صورت لیتولوژی غالب و صحت سنجی مطالعات در حد قابل قبول است. در این مقاله از نرم‌افزار پترل برای ساخت مکعب‌های سرعت و مقاومت صوتی، مدل‌سازی به روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی و کوکریجینگ و همچنین برنامه‌نویسی شرطی استفاده شده است. نرم‌افزار همپسون راسل ۸ (HRS-8) نیز جهت انجام وارون‌سازی و تولید مکعب مقاومت صوتی و نهایتاً از نرم‌افزار EXCEL 2019 جهت رسم مدل‌های فرکتالی براساس داده‌های خروجی از نرم‌افزار پترل استفاده شده است.

روش کار

ساخت مدل زمین‌شناسی ساختمانی براساس داده‌های لرزه‌ای و زمین‌شناسی

سازند های میدان آزادگان جنوبی براساس تعبیر و تفسیر افق‌های لرزه‌ای (برحسب داده زمانی[1]) و تطابق با داده‌های زمین‌شناسی حاصل از حفاری های اکتشافی مدل‌سازی شده و افق‌های لرزه‌ای برحسب داده عمقی به‌صورت سطوح جداگانه از لایه سطحی آغاجاری تا سازند گوتنیا ساخته شده و هر یک از سازندها براساس تعداد بخش‌های مختلف آن جداگانه مدل‌سازی شده است.

1. Time Domain

با توجه به عدم وجود سیستم‌های گسلی پیچیده در منطقه از مدل زمین‌شناسی دارای شبکه ساده توسط نرم‌افزار پترل اقدام به ساخت مدل زمین‌شناسی شده است.

مشخصات سازندهای مخزنی میدان آزادگان جنوبی

سازندهای مخزنی میدان آزادگان جنوبی شامل ۷ سازند پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان است که در ادامه به‌همراه سازندهای عمیق گرو و گوتنیا به‌صورت خلاصه ارائه شده‌اند.

سازند پابده

براساس تطابق تعبیر و تفسیر لرزه‌ای و داده‌های حفاری سازند پابده دارای ضخامت ۲۷۲ m در چاه A-001 و از سنگ‌آهک با نفوذپذیری کم تشکیل شده است، لیکن در سه منطقه که نفوذپذیری افزایش یافته، سازند نفتی است. با این حال برای محاسبات حجمی کل سازند پابده به‌عنوان یک واحد در نظر گرفته شد [۳۹]. به‌دلیل شباهت افق لرزه‌ای سازند فوق با افق آسماری، در هنگام ساخت لایه‌های زمین‌شناسی در نرم‌افزار پترل به‌صورت مشترک با سازند آسماری به‌عنوان لایه واحد آسماری-پابده در نظر گرفته شده است. ضخامت متوسط سازندهای آسماری و پابده در مدل زمین‌شناسی ساختاری ۷۲۷/۸ m است.

سازند گورپی

سازند گورپی ۲۵۵/۴ m ضخامت سنگ‌آهک در چاه A-001 دارد، نفت در سرتاسر آن وجود دارد اما فقط در چند فواصل گسسته مخزن خوبی وجود دارد [۳۹]. برای محاسبات حجمی سازند گورپی با ضخامت کلی به‌صورت متوسط ۳۶۸/۴ m و بخش تاربور در قسمت انتهایی آن با ضخامت متوسط m ۲۲۳/۸ در نظر گرفته شد.

سازند ایلام

ایلام از سنگ‌آهک تشکیل شده است. براساس تعبیر و تفسیر لرزه‌ای ضخامت آن در چاه A-001 به‌میزان ۸۳/۵ m و ضخامت متوسط ۱۲۲/۵ m در مدل ساختاری است. به دلیل وجود شباهت زیاد افق‌های لرزه‌ای سازند لافان و سروک، این سازند در جنوب ضخیم‌تر می‌شود که این امر موجب دشواری تعبیر و تفسیر و پیدا کردن سر سازند سروک شده است.

سازند سروک

مخزن آهکی سروک، مخزن اصلی میدان آزادگان است. ضخامت آن ۶۰۵ m در چاه A-001 با ستون ۲۰۰ m هیدروکربور است و سطح تماس آب و نفت در عمق ۲۸۷۴ m مشاهده می‌شود. متوسط ضخامت مدل ساختاری نیز ۶۵۶/۴ m است.

سازند کژدمی

سازند کژدمی عمدتاً از شیل و مارل تشکیل شده است اما دارای مخزن ماسه‌سنگی به ضخامت m ۱۸/۵ به‌سمت قاعده سازند است. ممکن است این واحد ماسه‌سنگی به‌سمت جنوب میدان ضخیم شود. سطح تماس آب و نفت در عمق ۳۵۰۲/۵ m برای مخزن ماسه‌سنگ کژدمی مشاهده شده است. متوسط ضخامت سازند فوق در مدل زمین‌شناسی ۲۲۵/۸ m است.

سازند گدوان

سازند گدوان عمدتاً از شیل و سنگ‌آهک تشکیل شده است، اما دارای ماسه‌سنگی به ارتفاع ۴۸/۵ m بوده که مانند ماسه‌سنگ کژدمی ممکن است در جنوب این میدان ضخیم شود. متوسط ضخامت کلی سازند گدوان ۱۸۶ m و در بخش پایینی خلیج ۱۲۳/۵ m است.

سازند فهلیان

سازند فهلیان شامل سنگ‌آهک‌های رسی ضخیم با کیفیت مخزنی ضعیف است که حاوی مقداری نفت سنگین بوده ولی کیفیت مخزن به‌سمت جنوب بهبود می‌یابد [۳۹]. متوسط ضخامت سازند فهلیان در بخش بالایی ۱۵۱/۷ m و در بخش پایینی تا ابتدای سازند گوتنیا به‌طور متوسط ۸۵۰/۴ m است [۳۹-۴۱].

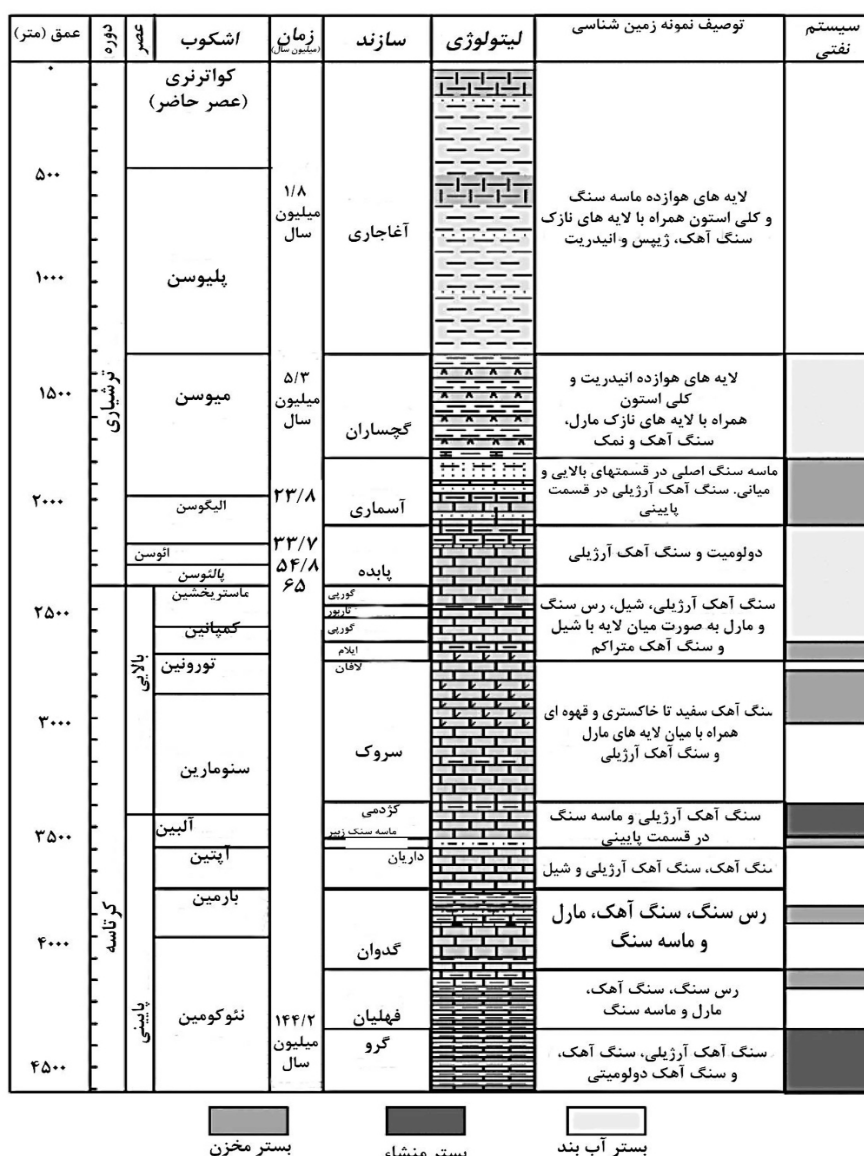
سازند گرو

سنگ‌شناسی قسمت انتهایی در چاه‌های موجود عمدتاً سنگ رس و انیدریت، نمک و شیل و سنگ‌آهک است. این سازند عمدتاً شامل سنگ آهک و مقادیر متغیری کانی‌های رسی شامل کلریت می‌باشد. مقادیر ناچیزی نیز به‌طور پراکنده فلزات سنگین مشاهده می‌شود [۳۹ و ۴۰].

سازند گوتنیا

سازند گوتنیا مربوط به بخش انتهایی دوران کرتاسه و سازندهای دوران ژوراسیک تنها در یک چاه مورد حفاری قرار گرفته است که براساس نتایج تعبیر و تفسیر نمونه‌های زمین شناسی، سنگ شناسی این سازند عمدتاً از لایه های ضخیم انیدریت به‌همراه مقادیر متغیری سنگ آهک و درصد ناچیزی کانی‌های رسی از جمله کلریت تشکیل شده و همچنین یک لایه حاوی نمک مشاهده شده است. این سازند از لحاظ مخزنی فاقد پتانسیل هیدروکربوری بوده و متراکم می‌باشد [۴۰ و ۴۱].

ستون چینه‌شناسی سازندهای میدان آزادگان جنوبی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی میدان آزادگان جنوبی با استفاده از مقاطع لرزه‌ای و داده‌های حفاری [۴۱].

مدل سرعت VSP لایه‌ای

مدل سرعت لایه‌ای با استفاده از رابطه سرعت داده‌های نقاط کنترلی و مقطع نگاری عمودی با تغییرات عمق در چاه‌های دارای اطلاعات طبق رابطه ۴ تهیه شده و ضرایب V_0 و K با ضریب همبستگی ۰/۹۵ تعیین شده است (شکل ۳).

$$V = V_0 + K * Z \qquad (۴)$$

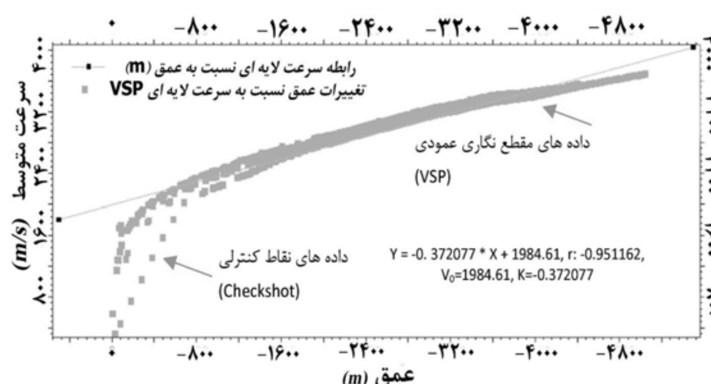
در این رابطه، K ضریب ثابت تبدیل لایه های افق‌های عمقی به سرعت متوسط لایه‌ای و V_0 سرعت لایه سطحی است. از داده‌های سر سازندهای ایلام، سروک، کژدمی، گدوان، فهلیان و گرو جهت تطابق با داده‌های افق‌های لرزه‌ای عمقی استفاده شده است. برای لایه سطحی آغاجاری نیز به‌دلیل در اختیار نداشتن افق لرزه‌ای سطحی از رابطه $V=V_0=V_{int}$ و برای سایر لایه‌ها از رابطه ۴ با مقادیر V_0= ۱۹۸۴/۶۱ و K= -۰/۳۷۲۱ برای تبدیل لایه‌های افق‌های عمقی به سرعت متوسط بر طبق جدول زیر استفاده شده است. نهایتاً، سرعت متوسط هرسازند با استفاده از رابطه ۵ محاسبه و نقشه سرعت متوسط هر لایه به‌صورت جداگانه تهیه و خلاصه نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

$$V_{avg}\left(\frac{m}{s}\right) = 2000 * {Z\,(m)}/{TWT\,(ms)} \qquad (۵)$$

در این رابطه، TWT زمان رفت و برگشت موج برحسب میلی ثانیه (ms)، Z عمق برحسب متر (m) و V_{avg} سرعت لایه‌ای برحسب متر بر ثانیه (m/s) است. بر این اساس، سرعت متوسط سازند سطحی آغاجاری به‌میزان ثابت ۱۹۸۴/۶ m/s محاسبه شده است. بیشترین سرعت متوسط در محدوده ۲۹۰۰ m/s – ۲۷۶۰ در سمت شمال شرق مربوط به سازند گوتنیا و کمترین آن مربوط به سازند گچساران با ۲۱۵۰ -۲۲۸۰ m/s در جهت جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است. به‌عنوان مثال بر طبق شکل ۴ تغییرات سرعت متوسط سازند فهلیان پایینی در محدوده ۲۳۳۰-۲۷۶۰ m/s بوده و بیشترین مقادیر سرعت متوسط در شمال شرق و کمترین آن در جنوب‌غرب نمایان است.

مدل سرعت فشاری (V_p) براساس داده‌های نگار سرعت فشاری DT

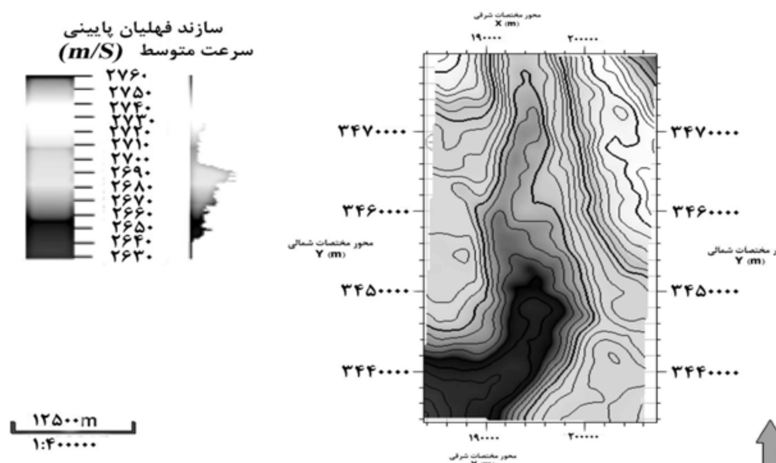
برای تهیه مکعب سرعت فشاری با داده‌های نگار سرعت فشاری نیاز به تکمیل داده‌ها برای تمام چاه‌های مورد بررسی از سطح زمین تا انتهای چاه بوده است. با توجه به این‌که هیچ‌کدام از نگارهای سرعت فشاری از سطح زمین برداشت نشده است، لذا استفاده از شبکه‌های عصبی برای ساخت مدل سرعت در لایه‌های سطحی فاقد اطلاعات مقدور نبود. بنابراین با توجه به اینکه هشت حلقه چاه دارای سرعت لایه‌ای VSP و نیز چهار حلقه چاه دارای داده‌های اشعه گاما از سطح زمین تا انتهای چاه بوده‌اند لذا در مرحله اول با تعیین رابطه بین نگارهای $V\,(VSP)_{int}$ و Gr نگار جدیدی به‌نام $V_{p.temp}$ ساخته شد.



شکل ۳ ضریب همبستگی داده‌های سرعت متوسط نقاط کنترلی، مقطع نگاری عمودی و عمق برای تعیین ضرایب مدل سرعت.

جدول ۱ مقادیر میانگین سرعت حداقل و حداکثر لایه‌ها براساس داده‌های VSP و افق‌های لرزه‌ای.

سازند	سرعت متوسط حداقل (m/s)	جهت سرعت حداقل	متوسط سرعت حداکثر (m/s)	جهت سرعت حداکثر
آغاجاری	۱۹۸۴/۶	ثابت	۱۹۸۴/۶	ثابت
گچساران	۲۱۵۰	جنوب‌غربی	۲۲۸۰	شمال‌غربی
آسماری و پابده	۲۲۰۰	جنوب‌غربی	۲۳۴۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
گورپی	۲۳۳۰	جنوب‌غربی	۲۴۶۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
بخش تاربور (سازند گورپی)	۲۳۷۰	جنوب‌غربی	۲۴۸۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
ایلام و لافان	۲۴۱۰	جنوب‌غربی	۲۵۱۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
سروک	۲۴۳۰	جنوب‌غربی	۲۵۳۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
کژدمی	۲۵۳۰	جنوب‌غربی	۲۶۳۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
داریان	۲۵۶۰	جنوب‌غربی	۲۶۷۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
گدوان	۲۵۹۰	جنوب غربی	۲۷۰۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
بخش خلیج (سازند گدوان)	۲۶۰۰	جنوب غربی	۲۷۱۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
فهلیان بالایی	۲۶۲۰	جنوب غربی	۲۷۳۰	شمال‌شرق و شمال‌غربی
فهلیان پایینی	۲۳۳۰	جنوب غربی	۲۷۶۰	شمال‌شرقی
گوتنیا	۲۷۶۰	جنوب غربی	۲۹۰۰	شمال‌شرقی



شکل ۴ سرعت متوسط سازند فهلیان پایینی براساس افق‌های لرزه‌ای و داده‌های VSP

در مرحله دوم با استفاده از کد نویسی شرطی در نرم‌افزار پترل، نگار دیگری به‌نام V_2 طبق رابطه ۶ ساخته شد به‌گونه‌ای که در هر عمقی که داده V_{int}(VSP) وجود داشته ولی داده سرعت فشاری Vp موجود نباشد، V_{int}(VSP) معادل Vp در نظر گرفته شود.

$$V2 = if\ (V = U,\ Interval_velocity_VSP,\ V) \quad (6)$$

ضرایب همبستگی سرعت نگار VSP و سرعت فشاری Vp برای هرکدام از ۸ حلقه چاه جداگانه محاسبه شده و رابطه میانگین به‌دست آمده برای همه چاه‌ها استفاده شده است (جدول ۲). داده‌های اولیه نگار سرعت فشاری برحسب میکروثانیه بر فوت (DT) بوده که با رابطه ۷ تبدیل به متر بر ثانیه شده است.

جدول ۲ ضرایب همبستگی سرعت لایه‌ای VSP و نگار سرعت فشاری Vp در چاه‌های دارای داده VSP

نام چاه	A-001	A-002	A-004	A-005	A-006	A-010	A-025	YD-006
ضریب همبستگی VSP و Vp	۰/۵۳۲۴	۰/۷۹۸۰	۰/۵۴۳۳	۰/۵۰۸۳	۰/۵۹۹۱	۰/۷۳۲۳	۰/۸۰۷۷	۰/۹۰۶۱
ضریب همبستگی کلی	$Vp = 0.33041 * V_{int}$ (VSP) + 3139.5, Correlation coefficient: 0.416904							

همچنین کلیه مقادیر خارج از ردیف داده‌های DT که به‌دلیل ایجاد نویز یا خطای برداشت به‌وجود آمده است حذف شده‌اند.

$$V_p\left(\frac{m}{s}\right)=\frac{304,785.13}{DT\left(\frac{\mu s}{ft}\right)} \qquad (۷)$$

در مرحله سوم با ترکیب داده‌های نگار V_2 و Vp.temp، نگار جدیدی به‌نام Vp.full طبق رابطه ۸ ساخته شد به‌گونه‌ای که قسمت‌های بدون داده نگار V_2 با داده‌های نگار Vp.temp تکمیل شود:

$$Vp_Full = If\ (\ V2 = U, Vp_temp, V2\ ) \qquad (۸)$$

در مرحله چهارم پس از تکمیل داده‌های وزن مخصوص براساس تغییرات عمق، نگار دیگری به‌نام Vp.full2 براساس رابطه بین وزن مخصوص و داده‌های اولیه سرعت فشاری تهیه شد. نهایتاً در پنجمین مرحله نگار نهایی Vp.full_final طبق رابطه ۹ به‌گونه‌ای ساخته شده که هر کجا داده Vp.full موجود نباشد از داده‌های Vp.full.2 استفاده شود (شکل ۵).

$$Vp_Full_Final = If\ (\ Vp_Full = U, Vp_Full2, Vp_Full\ ) \qquad (۹)$$

براساس نگار Vp.full. final به‌دست آمده، کلیه ۲۳ حلقه چاه اکتشافی مورد بررسی در میدان آزادگان جنوبی دارای داده‌های کامل نگار سرعت فشاری از سطح زمین تا انتهای چاه شده و پس از توسعه مدل به کل مکعب[1]، محیای ساخت مدل مکعب سرعت در مرحله بعد شده‌اند (شکل ۶).

محاسبه و تکمیل مکعب سرعت برشی

مطالعات اولیه سرعت برشی شامل اندازه‌گیری سرعت برشی از روی مغزه‌های ۴ حلقه چاه اکتشافی و بررسی نسبت آن به نگار سرعت فشاری براساس تغییرات تخلخل و لیتولوژی و مرحله بعدی شامل برداشت نگار برشی DSI به‌صورت مقطعی در سه حلقه چاه است که در هر مرحله نسبت به تکمیل مکعب‌های نگار سرعت برشی و مقایسه با داده‌های اولیه جهت تعیین مکعب نهایی سرعت برشی اقدام شده است.

استفاده از نتایج آزمایشگاهی چاه‌های حفاری براساس تغییرات لیتولوژی

به‌صورت کلی در صورت عدم وجود نگار سرعت برشی به‌صورت کلی از طریق رابطه کاستانیا[2] با استفاده از نگار سرعت فشاری و تغییر لیتولوژی اقدام به محاسبه سرعت برشی می‌شود [۱۶،۱۷ و ۵۰-۴۲].

(۱۰) سازند آهکی

$$V_s = -0.05509V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$$

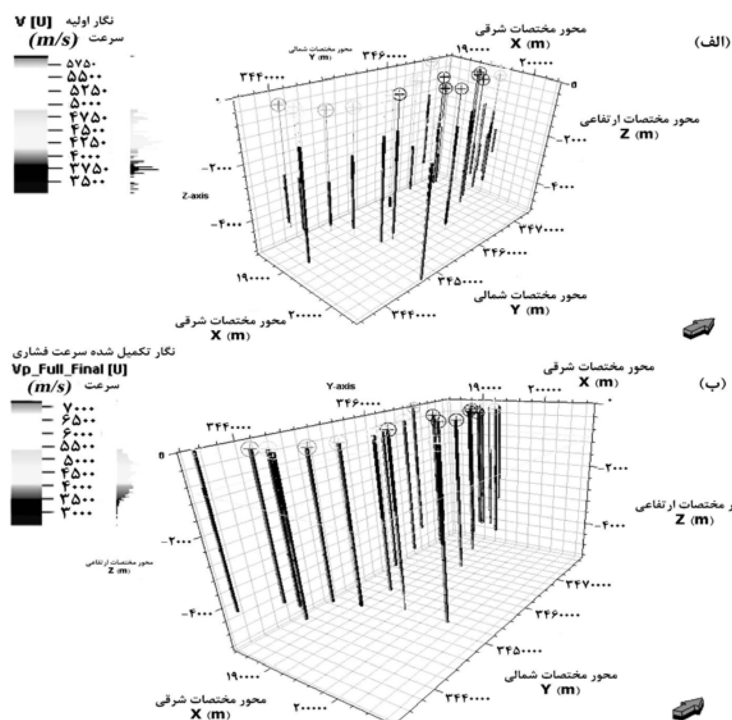
(۱۱) سازند ماسه‌سنگی $V_s = 1.0168V_p - 1.0305$

(۱۲) سازند دولومیتی $V_s = 0.583V_p - 0.07776$

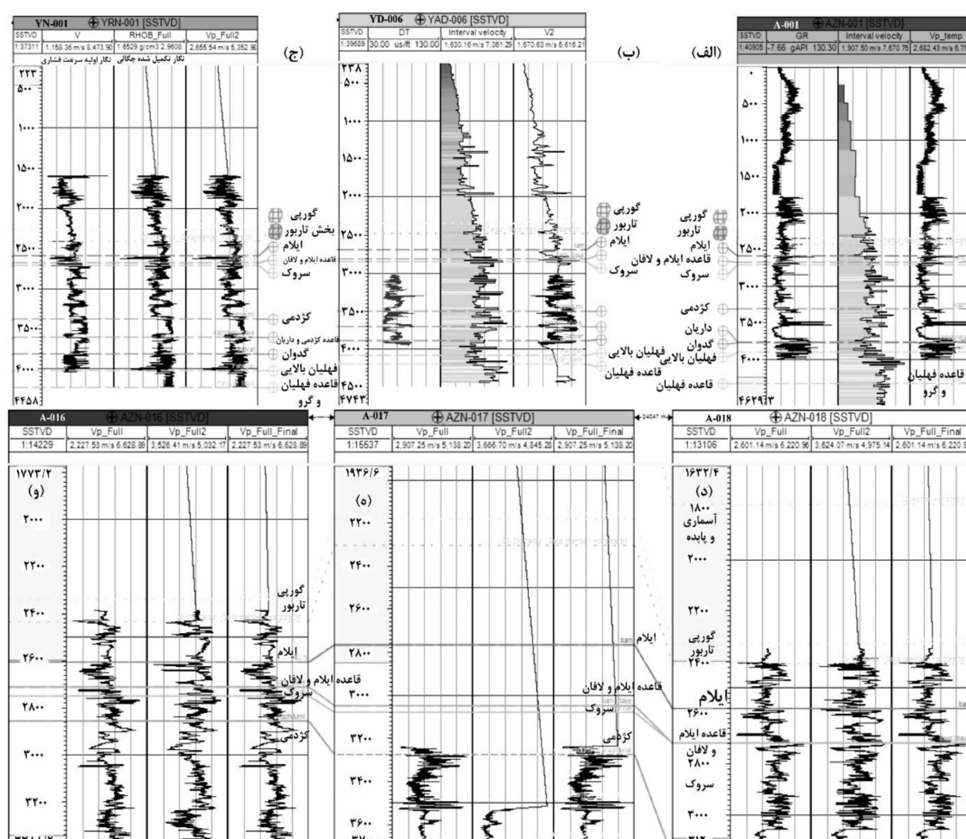
(۱۳) سازند شیلی $V_s = 0.77V_p - 0.8674$

این مرحله از مطالعات براساس رابطه نگار سرعت فشاری چهار حلقه چاه اکتشافی و سرعت برشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه شرکت TRC ژاپن در سال، تغییرات لیتولوژی با توجه به لیتولوژی غالب ماسه‌سنگ، ترکیب سنگ‌آهک، مارل و شیل و همچنین سنگ‌آهک غالب با بالاترین ضرایب همبستگی تعیین شده است، سپس با بررسی لیتولوژی کل چاه‌های مورد مطالعه به‌صورت جداگانه، نگار سرعت برشی هر چاه با استفاده از برنامه‌نویسی شرطی نرم‌افزار پترل محاسبه و تهیه شده است.

1. Scale Up
2. Castagna



شکل ۵ مدل تعمیم یافته الف) داده‌های نگار سرعت فشاری اولیه و ب) نهایی محدوده مطالعاتی



شـکل ۶ الـف) نمونـه‌ای از سـاخت نـگار اولیـه Vp.temp. براسـاس داده‌هـای نـگار V.VSP.int و Gr، ب) نـگار ثانویـه V_2 براسـاس داده‌هـای نـگار DT و (VSP) V_{int}، ج) سـاخت نـگار سـرعت Vp.full2 براسـاس داده‌هـای نـگار سـرعت اولیـه و وزن مخصـوص تکمیـل شـده و د-و) نمونه‌هایی از نـگار نهایـی Vp.full_final در صـورت عـدم وجـود داده Vp.full کـه از داده‌هـای Vp.full.2 اسـتفاده می‌شـود

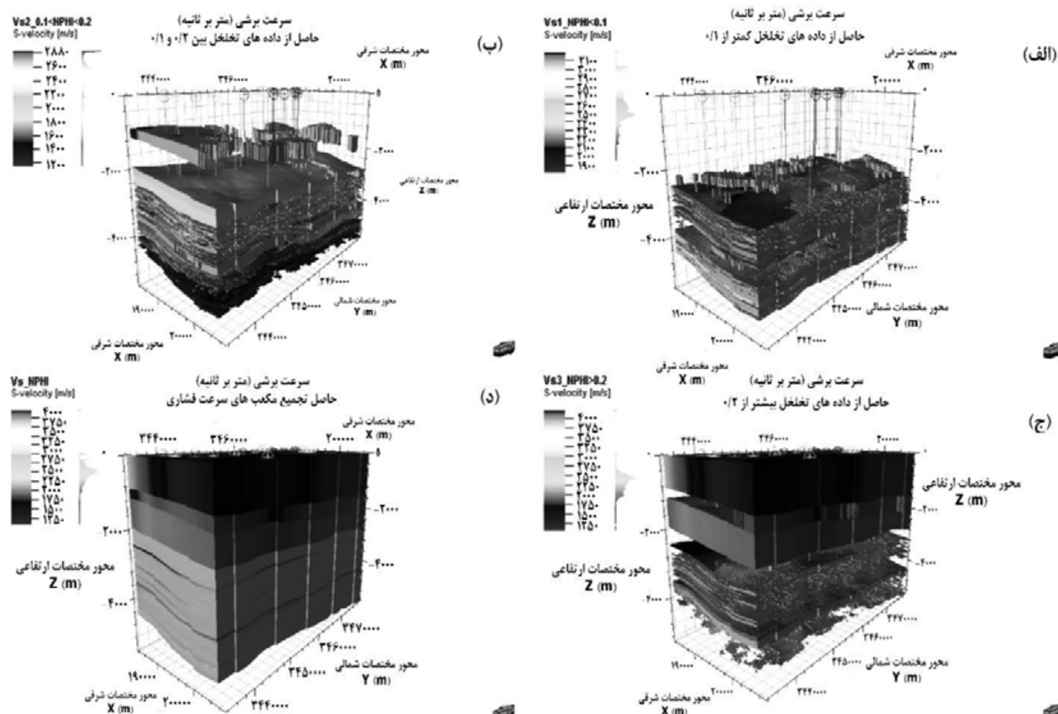
بـرای مثـال در یکـی از چاه‌هـا بـا مشـخص کـردن محدوده‌هـای ماسه‌سـنگی، سـنگ‌آهک مخلـوط بـا شـیل و سـنگ‌آهک خالـص براسـاس رابطـه ۱۴، برنامه‌نویسـی شـرطی سـاخت نـگار سـرعت برشـی چـاه فـوق بـه شـکل زیـر اسـت:

(۱۴) Vs=If(DEPT<1290, (0.738*Vp_Full_Final/1000-0.5653)*1000, If(DEPT>=1290 and DEPT<2330, (0.5243*Vp_Full_Final/1000+0.0451)*1000, If(DEPT>=2330 And DEPT<3300, (-0.1068* Pow (Vp_Full_Final/1000, 2)+1.5106*Vp_Full_Final/1000- 2.2008)*1000, If(DEPT>=3300 and DEPT<3890, (0.5243*Vp_Full_Final/1000+0.0451)*1000, If(DEPT>=3890 and DEPT<4640, (-0.1068* Pow (Vp_Full_Final/1000, (((((2)+1.5106*Vp_Full_Final/1000- 2.2008)*1000, U

پـس از تکمیـل مکعب‌هـای سـرعت برشـی حاصـل از روش‌هـای تغییـرات تخلخل شـکل ۷ و لیتولـوژی، ضرایب همبسـتگی مکعب‌هـای فـوق به‌میـزان ۰/۹۴ به‌دسـت آمـده کـه نشـان‌دهنده تطابـق بـالای نتایـج حاصـل از دو روش اسـت، لـذا بـا توجـه بـه اینکـه نگارهـای سـرعت برشـی حاصـل از تغییـرات لیتولـوژی به‌صـورت چـاه بـه چـاه محاسـبه شـده اسـت، جهـت انجـام صحت‌سـنجی از نگارهـای سـاخته شـده فـوق و داده‌های برداشـت شـده سـرعت برشـی اسـتفاده شـده اسـت.

اسـتفاده از نگارهـای سـرعت برشـی DSI برداشـت شـده در چاه‌هـای اکتشـافی

داده‌هـای اولیـه نگارهای سـرعت برشـی[1] (DSI) برداشـت شـده شـامل توالـی از چـاه A-006 در دو مقطـع از بخـش تاربورسـازند گورپـی و سـازند گـدوان و چاه‌هـای A-010 و A-025 در بخش‌هـای انتهایـی گـدوان تـا اوایـل فهلیـان پایینـی بـوده اسـت کـه پـس حـذف داده‌هـای خـارج از ردیـف، ضریـب همبسـتگی آنهـا بـا داده‌هـای نـگار سـرعت برشـی حاصـل از داده‌هـای لیتولـوژی مـورد محاسـبه قـرار گرفـت.



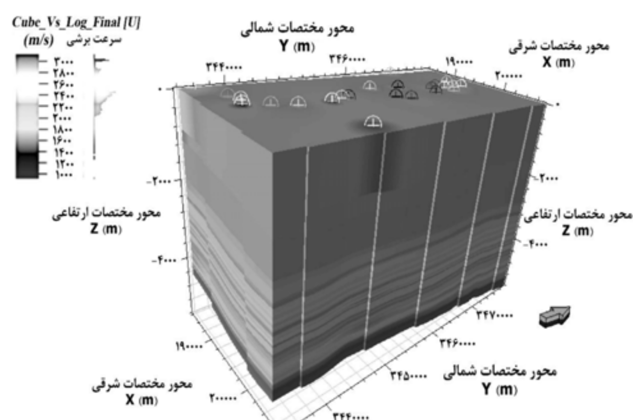
شـکل ۷ مکعـب سـرعت برشـی (m/s) براسـاس الـف) تخلخـل زیـر ۰/۱ و رابطـه سـرعت فشـاری بـا ضریـب همبسـتگی خطـی۰/۹۲، ب) تخلخـل بیـن ۰/۲ تـا ۰/۱ و رابطـه سـرعت فشـاری بـا ضریـب همبسـتگی غیـر خطـی ۰/۹۳، ج) تخلخـل بیشـتر از ۰/۲ و رابطـه سـرعت فشـاری بـا ضریـب همبسـتگی خطـی ۰/۹۷ و د) تلفیـق مکعب‌هـای سـرعت برشـی .

1. Dipole Sonic Imager (DSI)

براساس نتایج به‌دست آمده، ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های لیتولوژی با داده‌های اصلی سرعت برشی DSI نشان از صحت بالای مطالعات انجام شده بوده، لذا نگار نهایی سرعت برشی با تلفیق داده‌های سرعت برشی DSI با داده‌های اولیه تهیه شده است. جهت تهیه نگار نهایی سرعت برشی، نگارهای سرعت برشی DSI جایگزین داده‌های حاصل از لیتولوژی شده و نگار نهایی به‌صورت توسعه مدل به کل مکعب در آمده است. مکعب نهایی سرعت برشی با استفاده از روش مجذور معکوس فاصله (IDW) به‌دست آمده است (شکل ۸). بیشترین نوسانات سرعت برشی در محدوده ۲۲۰۰ تا m/s ۳۰۰۰ و حداکثر سرعت برشی به‌میزان بیشتر از m/s ۳۰۰۰ دراعماق بیشتر از m ۴۲۰۰ است. جهت حصول نهایی اطمینان از صحت مدل سرعت برشی، ضریب همبستگی مکعب‌های سرعت مدل نهایی با مدل بر پایه داده‌های تخلخل محاسبه شده که مقدار فوق ۰/۹۵به‌دست آمد و نشانگر قابل قبول بودن مدل ارائه شده است.

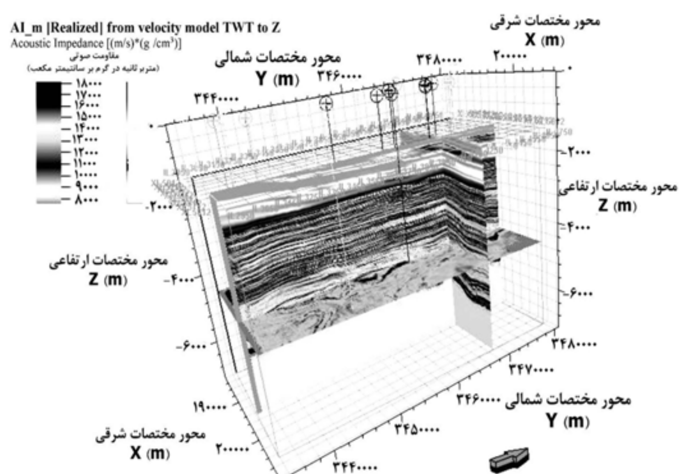
تکمیل مکعب مقاومت صوتی حاصل وارون‌سازی لرزه‌ای و مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای

پس از ورود داده‌های مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه نگاشت مصنوعی با بالاترین تطابق داده‌های اولیه در محل چاه‌ها و داده‌های مصنوعی وارون لرزه‌ای به‌میزان ۹۹/۶۱٪ و متوسط خطای نسبی به‌میزان ۸/۷۶٪ در حد قابل قبول، مکعب اولیه مقاومت صوتی برحسب داده‌های عمقی ساخته شده است (شکل ۹). در مرحله بعد مکعب مقاومت صوتی حاصل ضرب مقادیر نگار سرعت در نگار وزن مخصوص تهیه شده و نمودار همبستگی دو مکعب با میزان ۷۰٪ به‌دست آمد. لذا قسمت‌های خالی مکعب مقاومت صوتی وارون‌سازی شده با استفاده از مکعب مقاومت صوتی حاصل از نگارهای سرعت فشاری و وزن مخصوص تکمیل گردیده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). براساس نتایج به‌دست آمده مقادیر نهایی مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق پایین اکثراً در محدوده (m/s)*(g/cm³) ۱۵۰۰۰-۸۰۰۰ است که در محدوده سازندهای آهکی می تواند قرار گیرد، سازند سطحی آغاجاری با مقدار کمتر از (m/s)*(g/cm³) ۸۰۰۰ در محدوده سازندهای مارلی و شیلی قرار می‌گیرد که نتایج به‌دست آمده دارای تطابق بالایی با نمونه‌های زمین‌شناسی حین حفاری است. بیشترین مقادیر مقاومت صوتی نیز در بخش پایینی میدان در محدوده سازندهای فهلیان پایینی تا گوتنیا است. پس از ورود داده‌های سرعت لرزه‌ای پس از برانبارش[1] و ساخت مدل پتروفیزیکی مربوطه، اقدام به ساخت مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای جهت انتخاب مدل نهایی سرعت نهایی شده است.

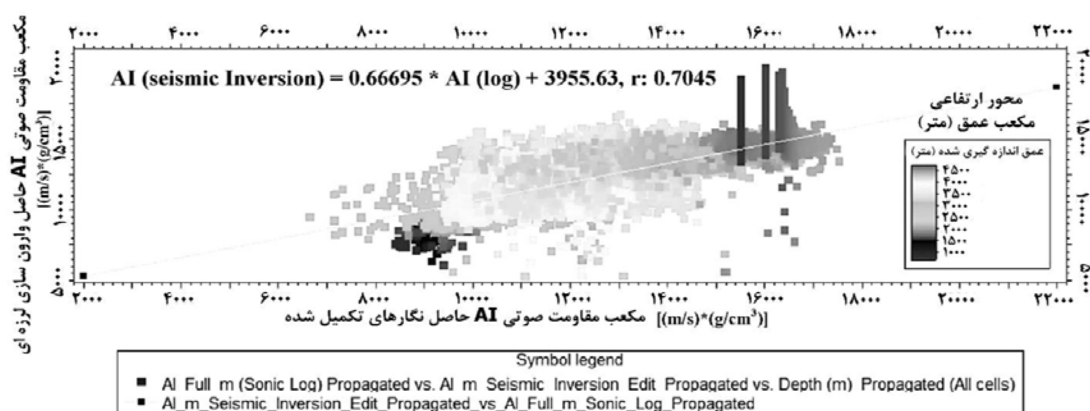


شکل ۸ مکعب نهایی سرعت برشی (m/s) میدان آزادگان جنوبی.

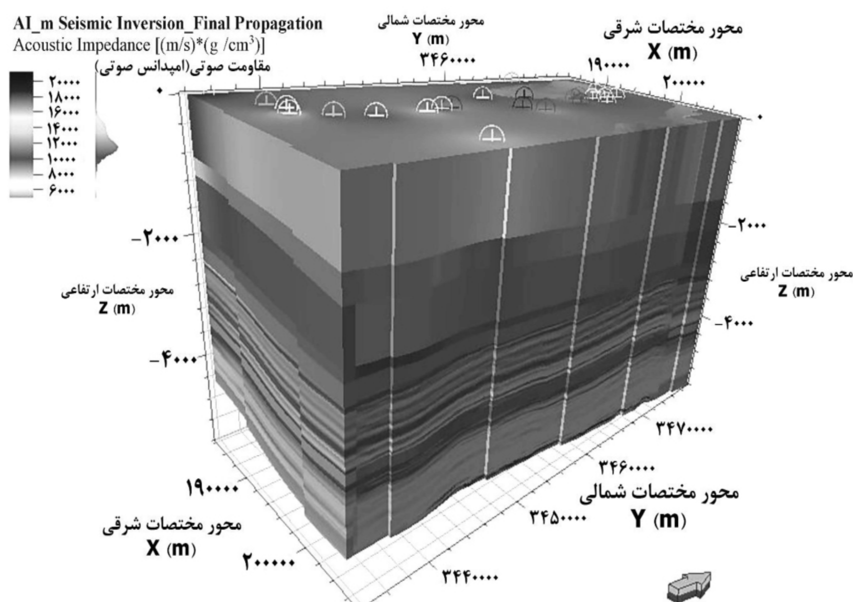
1. Post Stack



شکل ۹ تبدیل مقاومت صوتی خروجی از نرم‌افزار همپسون راسل به مکعب اولیه مقاومت صوتی (برحسب داده عمقی).



شکل ۱۰ تعیین ضریب همبستگی مقاومت صوتی AI حاصل از داده‌های نگار و وارون‌سازی لرزه‌ای اصلاح شده.



شکل ۱۱ مکعب نهایی مقاومت صوتی AI حاصل از داده‌های نگار و وارون‌سازی لرزه‌ای.

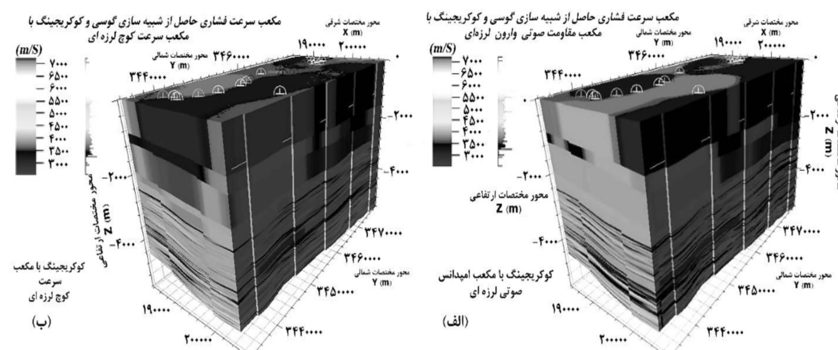
پژوهش نفت شماره ۱۲۸، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۲، صفحه ۱۷۰-۱۴۶

بحث

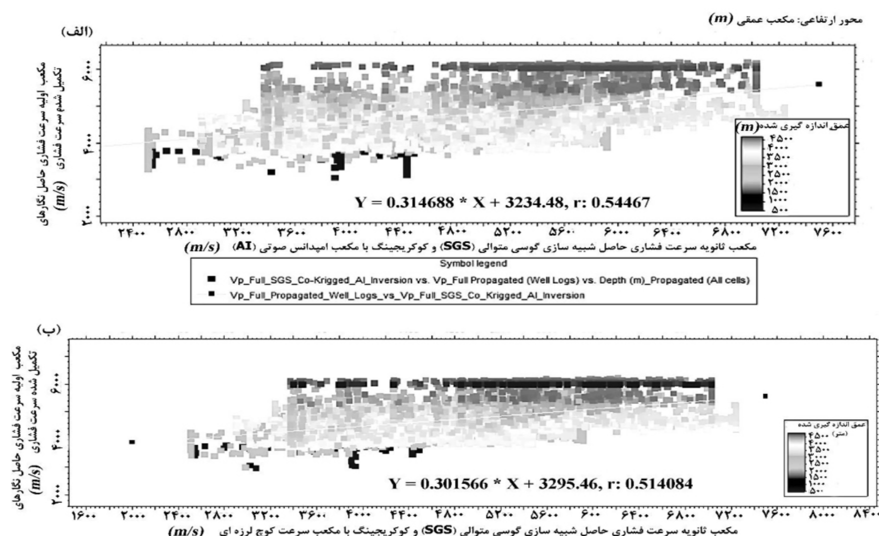
تعیین مدل ثانویه سرعت به روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی(SGS) و کوکریجینگ

در این مرحله جهت تعیین مدل نهایی سرعت، داده‌های تکمیل شده نگار سرعت فشاری با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مکعب‌های مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و همچنین مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای به‌صورت جداگانه مورد مدل‌سازی مجدد قرار گرفته و پس از محاسبه ضرایب همبستگی مکعب‌های آنها، مدل دارای ضریب همبستگی بالاتر به‌عنوان مدل نهایی جهت تعیین فشارهای مؤثر و منفذی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۲).

بنابرنتایج به‌دست آمده ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری حاصل شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی حاصل وارون لرزه‌ای و مکعب اولیه سرعت به روش معکوس فاصله به‌میزان ۰/۵۴ و همچنین ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری حاصل شبیه‌سازی گوسی و کوکریجینگ توأم با سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای و مکعب اولیه سرعت به‌میزان ۰/۵۱ است، لذا جهت مدل‌سازی فشار مؤثر به روش باورز استفاده از مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکرجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای پیشنهاد شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲ مکعب نگار سرعت فشاری به‌روش SGS و کوکریجینگ شده با الف) مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و ب) مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای.



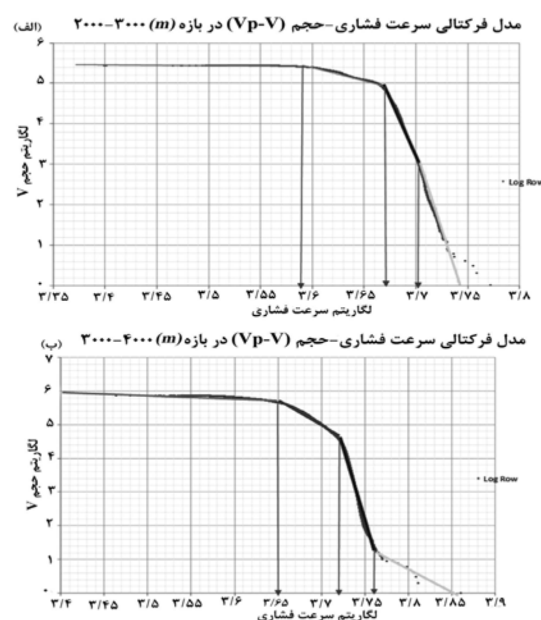
شکل ۱۳ الف) ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری کوکریجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای و مکعب اولیه سرعت به‌روش معکوس فاصله و ب) ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری کوکریجینگ با سرعت کوچ لرزه‌ای لایه ای و مکعب اولیه سرعت به‌روش معکوس فاصله.

مدل فرکتالی مقدار حجم سرعت فشاری

نمودارهای فرکتالی مقدار- حجم حاصل از مکعب سرعت فشاری (Vp) برای فواصل ۱۰۰۰ m تهیه شده است که در فاصله سطح تا ۱۰۰۰ m ، ۷ رژیم سرعت فشاری بین کمتر از ۳۳۵۷/۴ تا m/s ۴۴۰۵/۵ در سازند آغاجاری و در ادامه تا ۲۰۰۰ m، ۲ رژیم سرعت فشاری بین ۳۱۶۲/۲۸ و ۳۸۰۱/۹ m/s در ادامه سازند آغاجاری و سازند گچساران و ۲ رژیم سرعت فشاری دیگر بین ۴۲۶۵/۸ تا بیشتر از m/s ۴۳۸۵/۳ مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده سازندهای آسماری و پابده باشد. در فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ m، ۴ رژیم سرعت فشاری حاصل از سه نقطه شکست نمودار بین ۳۸۹۰/۴ و ۵۰۱۱/۹ m/s بین سازندهای آسماری تا سروک مشاهده می‌شود. در فاصله ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ m نیز ۴ رژیم سرعت فشاری حاصل از ۳ نقطه شکست بین ۴۴۶۶/۸ و ۵۷۵۴/۴ m/s در فاصله سازندهای کژدمی تا بخش خلیج سازند گدوان وجود دارد. در فاصله ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ m، ۸ رژیم سرعت فشاری بین ۴۴۱۵/۷ تا ۶۲۳۷/۴ m/s بین بخش خلیج سازند گدوان تا قسمتی از سازند سرگلو مشاهده می‌شود. نهایتاً در فاصله ۵۰۰۰ تا m ۵۵۹۰ نیز ۴ رژیم سرعت فشاری با سه نقطه شکست بین ۵۹۵۶/۶ و ۶۱۰۹/۴ m/s مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز در دوره ژوراسیک می‌باشند. دو نمونه از نمودارهای مدل فرکتالی مقدار-حجم فواصل m ۴۰۰۰-۲۰۰۰ مکعب سرعت فشاری میدان آزادگان جنوبی در ادامه ارائه شده است (شکل ۱۴).

تطابق مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم سرعت فشاری و مدل زمین‌شناسی با استفاده از ماتریس لوگرشیو

لیتولوژی بازه ۱۰۰۰ m-۰ دارای تغییرات بسیار اندک به‌صورت غالب مارل و ماسه‌سنگ است، لذا از محاسبه ماتریس لوگرشیو برای بازه فوق صرف‌نظر شده است. براساس تقسیم‌بندی رژیم‌های سرعت فشاری در فواصل ۱۰۰۰ تا ۵۵۹۰ m به ۲۵ رژیم مختلف و تعیین مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها (شامل ۲۰ بازه سنگ‌آهک خالص، ۳ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، ۱ بازه انیدریت و ماسه‌سنگ و ۱ بازه مارل و ماسه‌سنگ)، ماتریس‌های لوگرشیو به‌صورت جداگانه محاسبه شده است.



شکل ۱۴ مدل فرکتالی مقدار- حجم سرعت فشاری الف) فاصله ۳۰۰۰-۲۰۰۰ m (سازند پابده تا بخش بالایی سروک) و ب) فاصله ۴۰۰۰-۳۰۰۰ m (سازندهای سروک تا بخش خلیج سازند گدوان).

- بر این اساس در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به‌میزان ۰/۷۴ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۶۱۰۹/۴ m/s در اعماق ۵۰۰۰ تا ۵۵۹۰ m مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز و کمترین آن به‌میزان ۰/۳۲ در بازه سرعت فشاری بین ۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/۴ m/s مربوط به سازندهای بخش خلیج سازند گدوان تا سرگلو در اعماق ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ m است.

- در بازه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۶۴ در بازه سرعت فشاری بین ۳۸۰۱/۹ تا ۴۲۶۵/۸ m/s در اعماق ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ m مربوط به سازندهای آغاجاری تا پابده است.

- نهایتاً در بازه مارل و ماسه‌سنگ غالب، تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۸۵ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۳۱۶۲/۳ m/s و همچنین در بازه انیدریت و رس سنگ غالب، تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۸۵ در بازه سرعت فشاری بیشتر از ۴۳۸۵/۳ m/s در اعماق مشابه ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ m است.

بنابراین با توجه به بازه‌های آهکی غالب، بیشترین میزان تطبیق نهایی (OA) به‌میزان ۰/۷۴ محاسبه شده که نشان از تطابق بالای مدل مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی با بازه‌های سنگ‌آهک غالب است. جدول مقادیر خطا و تطبیق نهایی بازه‌های سرعت فشاری به‌همراه دو نمونه از ماتریس‌های لوگرشیو مربوطه در جداول ۵-۳ ارائه شده است. همچنین، پس از تکمیل نمودارهای فرکتالی مقدار- حجم و تعیین نقاط شکست هر بازه به‌صورت مدل ریاضی، براساس تغییرات سازند و لیتولوژی غالب بازه‌های فوق (مدل زمین‌شناسی) نسبت به محاسبه ماتریس لوگرشیو[1] براساس جدول ۵ برای مدل سرعت فشاری جهت تعیین بالاترین تطابق و کمترین میزان خطا اقدام شد که نتایج در ادامه ارائه شده است.

جدول ۳ ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری در محدوده ۴۲۶۵/۸ m/s- ۳۸۰۱/۹ و مدل زمین‌شناسی ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب فاصله ۲۰۰۰-۱۰۰۰ m.

		مدل زمین‌شناسی ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب			
		داخل زون		خارج زون	
مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۲۶۵/۸ m/s تا۳۸۰۱/۹	داخل زون	مثبت واقعی (A)	۶۷۸۳	مثبت کاذب (B)	۵۷۳۹
	خارج زون	منفی کاذب (C)	۶۰۰	منفی واقعی (D)	۴۵۵۹
		خطای مدل اول:C/(A+C)	۰/۰۸۱۳	خطای مدل دوم :B/(B+D)	۰/۵۵۷۳
		تطبیق نهایی: (A+D)/(A+B+C+D)			۰/۶۴۱۵

جدول ۴ ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱ m/s و مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب فاصله ۴۰۰۰-۳۰۰۰ m.

		مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب			
		داخل زون		خارج زون	
مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱ m/s	داخل زون	مثبت واقعی (A)	۲۳۵۳۴۳	مثبت کاذب (B)	۱۸۶۷۸۹
	خارج زون	منفی کاذب (C)	۷۳۴۳۹	منفی واقعی (D)	۲۲۵۶۸۶
		خطای مدل اول:C/(A+C)	۰/۲۳۷۸	خطای مدل دوم :B/(B+D)	۰/۴۵۳۰
		تطبیق نهایی: (A+D)/(A+B+C+D)			۰/۶۳۹۱

1. Logratio

جدول ۵ مقادیر خطا و تطبیق نهایی (OA) ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری و مدل زمین‌شناسی غالب

بازه عمقی (m) و سازند	تعداد رژیم سرعت فشاری	مدل ریاضی سرعت فشاری (Vp) برحسب متر بر ثانیه	مدل ریاضی زمین‌شناسی غالب	خطای آنالیز و تحلیل ریاضی (Type I Error)	خطای نمونه‌برداری زمین‌شناسی (Type II Error)	تطبیق نهایی (OA)
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۵	کمتر از ۳۱۶۲/۳	مارل و ماسه‌سنگ	۰/۹۸۸	۰/۰۰۰	۰/۸۵
آغاجاری، گچساران، آسماری و پابده		۳۱۶۲/۳ تا ۳۸۰۱/۹	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۹۲۱	۰/۴۳۶	۰/۳۶
		۳۸۰۱/۹ تا ۴۲۶۵/۸	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۰۸۱	۰/۵۵۷	۰/۶۴
		۴۲۶۵/۸ تا ۴۳۸۵/۳	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲	۰/۵۸
		بیشتر از ۴۳۸۵/۳	انیدریت و رس سنگ	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰	۰/۵۷
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۴	کمتر از ۳۸۹۰/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۳۵	۰/۰۷۰	۰/۶۱
		۳۸۹۰/۴ تا ۴۶۷۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۴۰۵	۰/۷۱۱	۰/۴۰
		۴۶۷۷/۴ تا ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۶۷۲	۰/۲۱۶	۰/۶۱
آسماری، پابده، گورپی، ایلام و سروک		بیشتر از ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۹۸۸	۰/۰۰۳	۰/۶۳
۳۰۰۰-۴۰۰۰	۴	کمتر از ۴۴۶۶/۸	سنگ‌آهک	۰/۸۰۶	۰/۴۸۸	۰/۳۸
کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج		۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱	سنگ‌آهک	۰/۲۳۸	۰/۴۵۳	۰/۶۴
		۵۲۴۸/۱ تا ۵۷۵۴/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۵۶	۰/۰۵۹	۰/۵۶
		بیشتر از ۵۷۵۴/۴	سنگ‌آهک	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۷
۴۰۰۰-۵۰۰۰	۸	کمتر از ۴۴۱۵/۷	سنگ‌آهک	۰/۸۵۱	۰/۱۴۲	۰/۴۱
بخش خلیج گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو		۴۴۱۵/۷ تا ۴۶۷۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۶۳۰	۰/۱۸۲	۰/۵۴
		۴۶۷۷/۴ تا ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۸۴۸	۰/۰۷۶	۰/۴۴
		۵۰۱۱/۹ تا ۵۴۳۲/۵	سنگ‌آهک	۰/۸۱۸	۰/۱۰۱	۰/۴۵
		۵۴۳۲/۵ تا ۶۰۱۱/۷	سنگ‌آهک	۰/۸۹۲	۰/۲۶۴	۰/۳۴
		۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۸۴	۰/۱۶۴	۰/۳۲
		۶۰۹۵/۴ تا ۶۲۳۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۷۷	۰/۰۷۱	۰/۳۶
		بیشتر از ۶۲۳۷/۴	سنگ‌آهک	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۷
۵۰۰۰-۵۵۹۰	۴	کمتر از ۵۹۵۶/۶	سنگ‌آهک	۰/۹۱۷	۰/۱۳۹	۰/۶۷
		۵۹۵۶/۶ تا ۶۰۸۱/۳۵	سنگ‌آهک	۰/۳۲۷	۰/۶۹۴	۰/۴۰
نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز		۶۰۸۱/۳۵ تا ۶۱۰۹/۴	سنگ‌آهک	۰/۷۵۸	۰/۱۵۸	۰/۶۹
		بیشتر از ۶۱۰۹/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۹۸	۰/۰۰۹	۰/۷۴

تغییرات فضایی ناهمسان‌گردی مکعب نهایی سرعت فشاری با استفاده از رسم واریوگرام

برای ارزیابی تغییرات ناهمسان‌گردی (آنیزوتروپی) در مدل نهایی مکعب سرعت فشاری Vp (حاصل ترکیب روش SGS و کوکریجینگ با مکعب AI)، واریوگرام‌های تجربی با روش گاوسی در سه جهت عمودی، افقی با آزیموت اصلی °۰ و افقی با آزیموت فرعی °۲۷۰ ایجاد شده‌است. در واریوگرام عمودی، سقف واریوگرام ۰/۳۴و در واریوگرام های افقی اصلی و فرعی ۰/۹۶ است، لذا صحت داده‌ها در جهت افقی دارای اعتبار بیشتری است. محدوده ناهمسان‌گردی براساس محاسبات نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶ برای واریوگرام عمودی ۹۶ و برای جهت‌های اصلی و فرعی m ۱۱۸۵۰ است. محاسبات تجربی و محدوده ناهمسان‌گردی و همچنین واریوگرام‌ها در جداول ۶ و ۷ و شکل ۱۵ ارائه شده است.

اعتبارسنجی داده‌های فشار منفذی

در این بخش از مطالعات براساس رابطه ترزاقی، هر یک از مکعب‌های فشار موثر (P_{eff}) تکمیل شده (براساس روش‌های باورز، SGS توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای و همچنین IDW) از مکعب فشار روباره ($P_{O.B}$) کسر شده (رابطه ۱۵) و پس از تطابق مکعب‌های فشار منفذی (P_{pore}) ساخته شده با داده‌های اولیه فشار مؤثر برای سازندهای مختلف، مدل نهایی فشار منفذی انتخاب شده است.

$$P_{Pore} = P_{O.B} - P_{eff} \quad (۱۵)$$

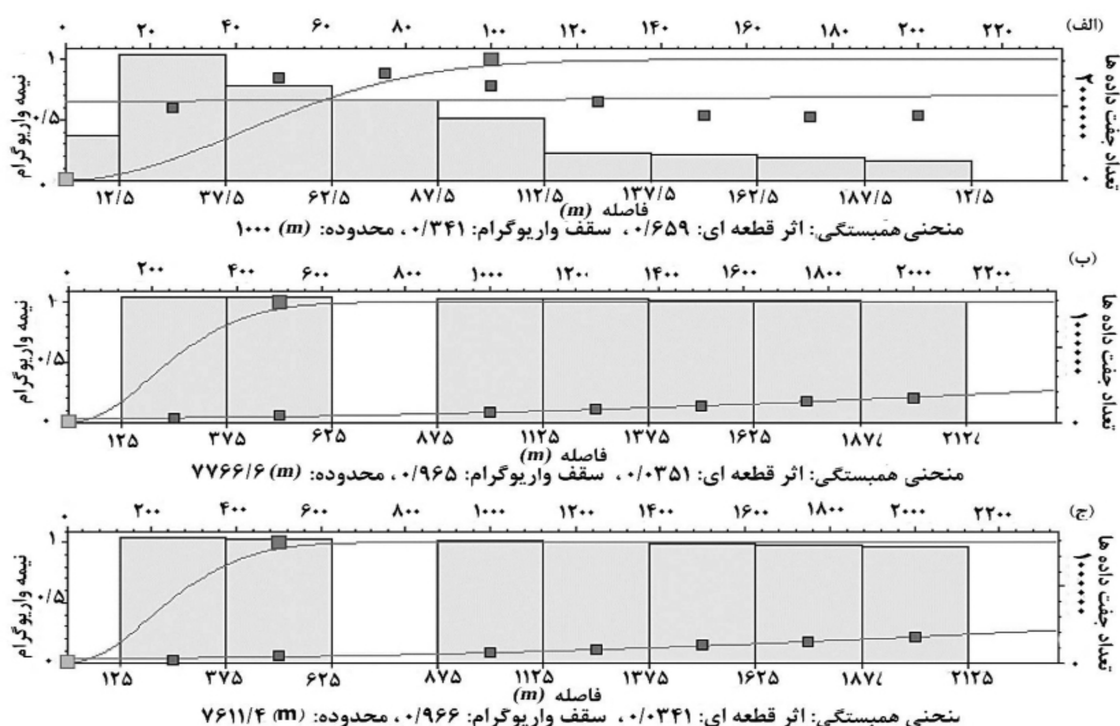
ضریب همبستگی در هر سه روش برای سازندهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته که در روش باورز ضرایب همبستگی در سازند های تاربور با ۰/۹۳، گدوان با ۰/۳۶ و خلیج با ۰/۲۷ مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند. در روش SGS ضرایب همبستگی در بخش تاربور سازند گورپی ۰/۷۳، سازند ایلام ۰/۴۷، سازند سروک ۰/۴۸، سازند کژدمی ۰/۱۴، داریان ۰/۲۷، گدوان ۰/۱۴، بخش خلیج سازند گدوان ۰/۱۹، فهلیان بالایی ۰/۲۲ و فهلیان پایینی تا گوتنیا برابر ۰/۵۷- است که بیشترین هم‌گرایی در بخش تاربور و فهلیان پایینی است، لیکن در روش IDW در تمامی موارد ضرایب همبستگی پایین تر از روش SGS و باورز و در مواردی منفی می‌باشند.

جدول ۶ محاسبه واریوگرام تجربی برای مکعب‌های سرعت نهایی.

جهت	آزیموت	شیب	تعداد گام‌ها (lags)	فواصل گام‌ها (m)	شعاع جستجو	پهنای باند	زاویه تلورانس	فواصل تلورانس (Lag tolerance)	ضخامت
عمودی	—	۹۰	۸	۲۵	۲۰۰	۵۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱
افقی اصلی	۰	۰	۸	۲۵۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱
افقی فرعی	۲۷۰	۰	۸	۲۵۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱

جدول ۷ نتایج واریوگرام گوسی مکعب نهایی سرعت فشاری به‌دست آمده با ترکیب روش‌های SGS و کوکریجینگ با امپدانس صوتی (AI) در محدوده مورد مطالعه.

جهت	اثر قطعه‌ای (Nugget)	سقف (Sill)	محدوده (m) (Range)	تعداد جفت‌ها (Pairs)	محدوده ناهمسان‌گردی (m) (Anisotropy Range)
عمودی	۰/۶۵۹	۰/۳۴۱	۱۰۰۰	۱۳۳۷۴۲۵۱	۶۸
افقی اصلی آزیموت ۰ درجه	۰/۰۳۵۱	۰/۹۶۵	۷۷۶۶/۶	۱۱۳۶۷۳۶۳	۱۱۸۵۰
افقی فرعی آزیموت ۲۷۰ درجه	۰/۰۳۴۱	۰/۹۶۶	۷۶۱۱/۴	۱۱۰۵۸۶۶۳	۱۱۸۵۰

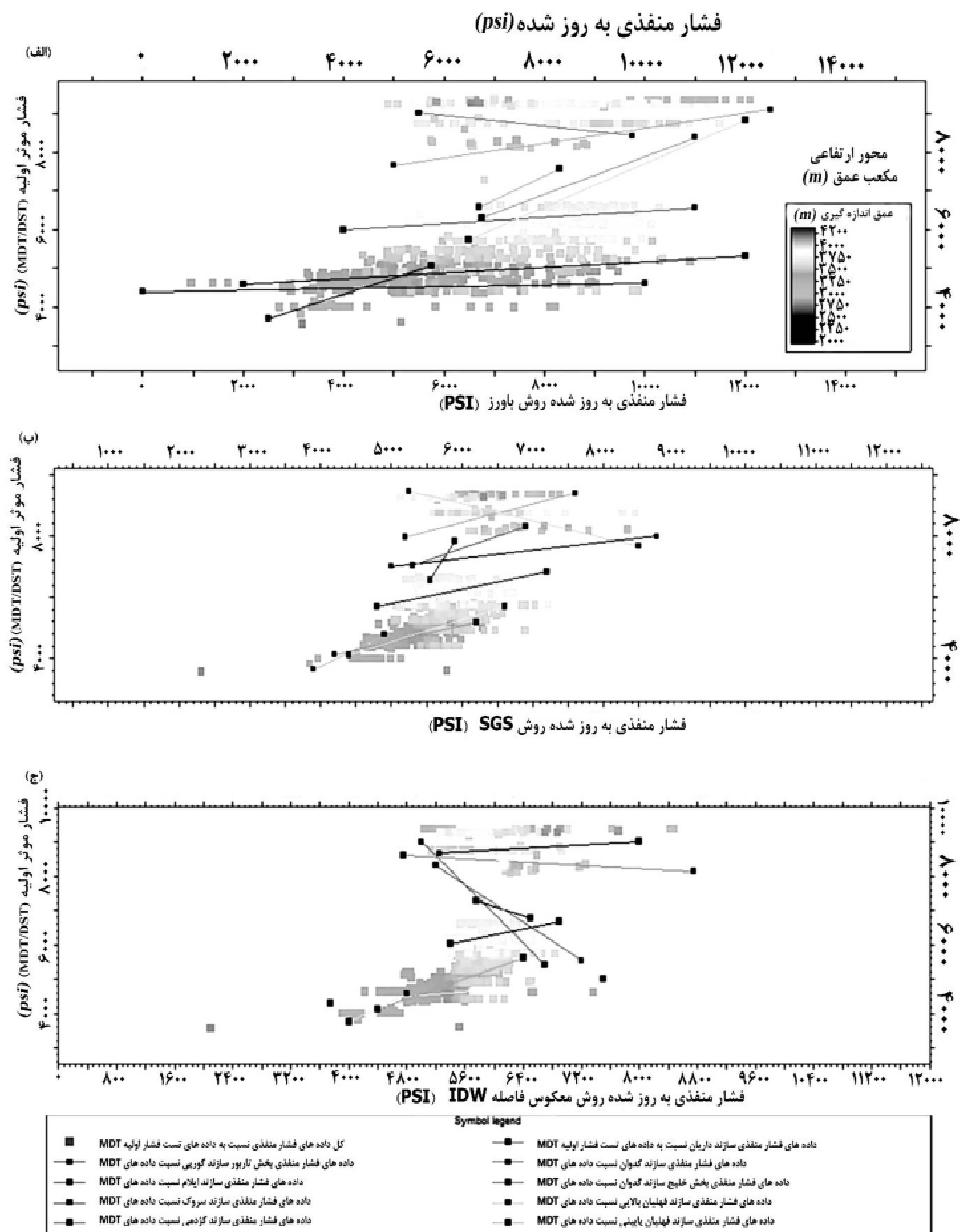


شکل ۱۵ نیمه واریوگرام مکعب نهایی سرعت فشاری در جهات: الف) عمودی، ب) افقی اصلی °۰ و ج) افقی فرعی °۲۷۰.

لذا صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای) مورد تایید و داده‌های حاصل از این روش برای گرادیان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۸ و شکل ۱۶).

جدول ۸ اعتبارسنجی حاصل از ضرایب همبستگی مکعب فشار منفذی سازندهای میدان مورد مطالعه برروی مدل‌های باورز، SGS و IDW با داده‌های اولیه آزمایش فشار MDT.

ضریب همبستگی مدل فشار منفذی و داده‌های فشار در سازند	روش باورز	روش SGS	روش IDW
بخش تاربور سازند گورپی	۰/۹۳	۰/۷۳	۰/۵۷
سازند ایلام	۰/۱۲	۰/۴۷	۰/۳۴
سازند سروک	۰/۲۴	۰/۴۸	۰/۴۸
سازند کژدمی	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۹
سازند داریان	۰/۱۹	۰/۲۷	-۰/۱
سازند گدوان	۰/۳۶	۰/۱۴	-۰/۴
بخش خلیج سازند گدوان	۰/۲۷	۰/۱۹	-۰/۴۹
سازند فهلیان بالایی	۰/۲۱	۰/۲۲	-۰/۰۶
سازند فهلیان پایینی	-۰/۲۵	-۰/۵۷	۰/۱
کل سازند های برداشت شده	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۴۴



شکل ۱۶ ضرایب همبستگی داده‌های اولیه فشار مؤثر MDT و مدل‌های فشار منفذی حاصل از روش‌های الف) باورز، ب) SGS کوکریجینگ شده با امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و ج) IDW.

نتیجه‌گیری

۱- براساس مدل سرعت لایه‌ای بیشترین سرعت متوسط در محدوده ۲۷۶۰ تا ۲۹۰۰ m/s در سمت شمال شرق محدوده مورد مطالعه مربوط به سازند گوتنیا و کمترین آن مربوط به سازند گچساران با ۲۱۵۰ تا ۲۲۸۰ m/s در جهت جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است.

۲- با توجه به عدم برداشت نگارهای سرعت فشاری از سطح زمین برداشت نشده است، لذا استفاده از شبکه‌های عصبی برای ساخت مدل سرعت در لایه‌های سطحی فاقد اطلاعات مقدور نبود، لذا تکمیل داده‌های نگار فوق با استفاده از داده‌های سرعت لایه‌ای VSP، اشعه گاما و وزن مخصوص طی ۵ مرحله با بالاترین ضریب همبستگی ممکن صورت پذیرفته است.

۳- جهت مطالعات فشار شکست سازند نیز مدل‌سازی مکعب سرعت برشی با استفاده از مغزه‌های چاه اکتشافی و نگار سرعت برشی است که مکعب نهایی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های تخلخل، لیتولوژی و داده‌های اصلی سرعت برشی DSI تعیین شده است.

۴- مقادیر مکعب مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق پایین میدان اکثراً در محدوده ۸ تا (g/cm³)*(m/s ۱۵) است که در محدوده سازندهای آهکی می‌تواند قرار گیرد.

۵- سازند سطحی آغاجاری با مقدار مقاومت صوتی کمتر از (g/cm³)*(m/s) ۸ در محدوده سازندهای مارلی و شیلی قرار می‌گیرد که نتایج به‌دست آمده دارای تطابق بالایی با نمونه‌های زمین‌شناسی حین حفاری است

۶- جهت مدل‌سازی فشار موثر به روش باورز استفاده از مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکرجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای که دارای ضریب همبستگی بالاتری نسبت به‌روش مشابه با مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای است پیشنهاد شده است.

۷- براساس مدل‌های فرکتالی سرعت-حجم، رژیم‌های سرعت فشاری در فواصل ۱۰۰۰ تا ۵۵۹۰ m به ۲۵ رژیم مختلف تقسیم شده و مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها شامل ۲۰ بازه سنگ‌آهک خالص، ۳ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، ۱ بازه انیدریت و ماسه‌سنگ و ۱ بازه مارل و ماسه‌سنگ است.

۸- براساس نتایج ماتریس لوگرشیو در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به‌میزان ۰/۷۴ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۶۱۰۹/۴ m/s در اعماق ۵۵۹۰-۵۰۰۰ m مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز و کمترین آن به‌میزان ۰/۳۲ در بازه سرعت فشاری بین ۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/m/s۴ مربوط به سازندهای بخش خلیج سازند گدوان تا سرگلو در اعماق ۵۰۰۰-۴۰۰۰ m است.

۹- براساس واریوگرام های مدل نهایی مکعب سرعت فشاری، میزان سقف واریوگرام و ناهمسان‌گردی در جهت عمودی به‌ترتیب ۰/۳۴ و ۹۶ متر و در جهت‌های افقی اصلی و فرعی به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۱۱۸۵۰ m است.

۱۰- با توجه به ضریب همبستگی بالاتر مکعب فشار منفذی حاصل از روش SGS و داده‌های اولیه آزمایش فشار مؤثر MDT نسبت به روش‌های باورز و IDW در سازندهای مشابه، صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای) مورد تایید و داده‌های حاصل از این روش برای گرادیان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری مهندسی معدن- اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب با طرح میزبانی پژوهشگاه صنعت نفت است.

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارشناسان محترم پژوهشگاه صنعت نفت و مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، ابراز کنند.

علائم و نشانه‌ها

AI: مقاومت صوتی($\frac{m \times g}{s \times cm^3}$)

DSI: موج صوتی فشاری و برشی ($\frac{\mu s}{ft}$)

DST: آزمایش فشار چاه

MDT: نگار آزمایش فشار چاه

IDW: معکوس فاصله وزن‌دار

r: ضریب همبستگی

SGS: شبیه‌سازی گوسی متوالی

TWT: زمان رفت و برگشت موج (mLs)

U: سلول فاقد داده

V.int: سرعت لایه‌ای (m/s)

VSP: مقطع نگاری عمودی لرزه‌ای

مراجع

[۱]. مداحی ا، قاضی نژاد س، اسماعیل پور س، حیدری م (۱۳۹۳) امکان‌سنجی بهره‌برداری از مطالعات لرزه‌نگاری چهار بعدی مخزن سروک در میدان آزادگان، مجله پژوهش نفت، ۷۸: ۱۲۶-۱۱۷.

[۲]. آدیم ع، ریاحی م ع، باقری م (۱۳۹۷) تخمین فشار منفذی به روش‌های ایتون و باورز با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری و چاه‌پیمایی، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۴، ۲: ۲۶۷-۲۷۵، doi: 10.22044/ jrag.2018.6360.1167.

[3]. Maurya S P, Singh N P, Singh K H (2020) Post-stack seismic inversion, In: Seismic Inversion Methods: A Practical Approach, Springer Geophysics, Chapter 3, 39-70, ISBN: 978-3-030-45662-7.

[4]. Shahbazi A, Soleimani Monfared M, Thiruchelvam V, Ka Fei T, Babasafari A A (2020) Integration of knowledge-based seismic inversion and sedimentological investigations for heterogeneous reservoir. Journal of Asian Earth Sciences, 202, 104541, doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104541.

[۵]. پور صیامی ح (۱۳۹۲) مدل‌سازی فشار منفذی مخزن هیدروکربونی در جنوب غرب ایران با استفاده از داده‌های چاه پیمایی، مجله پژوهش نفت، ۲۳، ۷۴ : ۸۶-۷۲، doi:10.22078 pr.2013.293.

[6]. Haque A E, Qadri S T, Bhuiyan M A H, Navid M, Nabawy B S, Hakimi M H, Abd-El-Aal A K (2022) Integrated wireline log and seismic attribute analysis for the reservoir evaluation: A case study of the Mount Messenger Formation in Kaimiro Field, Taranaki Basin, New Zealand. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 99, 104452, doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104452.

[7]. Radwan A A, Nabawy B S, Abdelmaksoud A, Lashin A (2021) Integrated sedimentological and petrophysical characterization for clastic reservoirs: A case study from New Zealand, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 88, 103797, doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103797.

[۸]. عاقبتی ر (۱۳۸۷) معرفی یک میدان: طرح توسعه میدان آزادگان، ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید، ۵۱، ۸-۶.

[9]. Jindal N, Kumar Biswal A, Hemant Singh K (2016) Time-depth modeling in high pore-pressure environment, offshore East Coast of India, AAPG 2016 Annual Convention and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, June 19-22.

[10]. Haris A, Sitorus R J, Riyanto A (2017) Pore pressure prediction using probabilistic neural network: case study of South Sumatra Basin, Southeast Asian Conference on Geophysics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science1 26324 (526071879)0 012021.

[11]. Bahmaei Z, Hosseini E (2020) Pore pressure prediction using seismic velocity modeling: case study, Sefid-Zakhor gas field in Southern Iran. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10: 1051–1062.

[۱۲]. امیرزاده م، کمالی م ر، نبی بیدهندی م (۱۳۹۲) بررسی خصوصیات مخزنی با انجام برگردان داده‌های لرزه‌ای و تلفیق نشان‌گرهای لرزه‌ای در سازند سروک در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران، مجله پژوهش نفت، ۲۳، ۷۵: ۲۹-۲۰.

[۱۳]. امیری بختیار م ص، زرگر ق، ریاحی م ع، انصاری ح ر (۱۳۹۶) وارون‌سازی لرزه‌ای زمین آماری به‌روش شبیه‌سازی طیفی در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران، سومین سمینار ژئوفیزیک اکتشافی نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۷۴-۷۰.
[14]. Abdolahi A, Chehrazi A, Kadkhodaie A, Babasafari A B (2022) Seismic inversion as a reliable technique to anticipating of porosity and facies delineation, a case study on Asmari Formation in Hendijan field, southwest part of Iran, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology.
[15]. Rointan A, Soleimani Monfared M, Aghajani H (2021) Improvement of seismic velocity model by selective removal of irrelevant velocity variations, Acta Geodaetica et Geophysica, 56: 145–176, doi.org/10.1190/geo2017-0248.1.
[16]. Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L (1985) Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, GEOPHYSICS, 50, 4: 571-581, doi.org/10.1190/1.1441933.
[17]. Castagna J P, Batzle M L, Kan (1993) Rock Physics:The link between rock properties and AVO response, In: Offset-dependet reflectivity - Theory and practice of AVO analysis, Investigations in Geophysics, 8, 135-171.
[۱۸]. فتاحی ه، عسکری م، مجدی فر س (۱۳۹۵) تخمین سرعت موج برشی در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران با استفاده ازچاه نمودارهای مختلف و یک روش جدید ترکیبی هوشمند مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته زمستان ۹۵، ۲۲: ۳۵-۴۳، doi:10.22055 /AAG.2016.12705.
[19]. Bowers G (1995) Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction, SPE Drilling and Completion, 10, 2: 89-95, doi.org/10.2118/27488-PA.
[20]. Bowers G L (2002) Detecting high overpressure, The Leading Edge, 21, 2: 113-224, doi.org/10.1190/1.1452608.
[21]. Badri MA, Sayers CM, Awad R, Graziano A (2000) A feasibility study for pore-pressure prediction using seismic velocities in the offshore Nile Delta, Egypt, The Leading Edge October 2000, Schlumberger Oilfield Services, Cairo, Egypt, 1103-1108.
[22]. Lantuejoul C h (2002) Geostatistical simulation models and algorithms, 1st edition, Springer-VerlagBerlin Heidelberg GmbH, 1-173.
[23]. Kelkar M, Perez G (2002) Applied geostatistics for reservoir characterization, 1st edition, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 30-50.
[24]. Bohling G (2007) Introduction to geostatics, hydro-geophysics: theory, methods, and modeling, 1st edition, Boise State University, Boise, Idaho, 259-269.
[25]. Armstrong M, Galli A, Beucher H, LeLoc'h G, Renard D, Eschard R, Doligez B, Geffroy F (2011) Pluri-gaussian simulations in geosciences, 1st edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1-173.
[26]. Karami O, Fallah A, Shataei S, Latifi H (2018) Assessment of geostatistical and interpolation methods for mapping forest dieback intensity in Zagros forests. Caspian Journal of Environmental Sciences, 16, 1: 73-86.
[27]. Mandelbrot B B (1985) Self-affine fractals and fractal dimension, Physica Scripta, 32, 4: 257, doi:10.1088/0031-8949/32/4/001.
[28]. Hassanpour S, Afzal P (2013) Application of concentration–number (C–N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran, Arabian Journal of Geosciences, 6: 957–970.
[29]. Afzal P, Fadakar Alghalandis, Y, Khakzad A, Moarefvand P, Rashidnejad Omran N (2011) Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration–volume modeling, Journal of Geochemical Exploration 108, 220–232, doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005.
[30]. Daneshvar Saein L, Rasa I, Rashidnejad Omran N, Moarefvand P, Afzal P (2012) Application of concentration-volume fractal method in induced polarization and resistivity data interpretation for Cu-Mo porphyry deposits exploration, case study: Nowchun Cu-Mo deposit, SE Iran, Nonliner Processes in Geophysics 19: 431–438, doi.org/10.5194/npg-19-431-2012.
[31]. Yasrebi A B, Hezarkhani A, Afzal P (2017) Application of Present Value-Volume (PV-V) and NPV-Cumulative Total Ore (NPV-CTO) fractal modelling for mining strategy selection, Resources Policy, 53, 384-393, doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.011.
[32]. Mahdizadeh M, Afzal P, Eftekhari M, Ahangari K (2022) Geomechanical zonation using multivariate fractal modeling in Chadormalu iron mine, Central Iran, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81, 1: 1-11.
[33]. Paravarzar, S., Maarefvand, P., Maghsoudi, A. Afzal, P. (2014). Correlation between geological units and mineralized zones using fractal modeling in Zarshuran gold deposit (NW Iran), Arabian Journal of Geosciences, 8: 3845–3854.
[34]. Pourgholam M M, Afzal P, Adib A, Rahbar K, Gholinejad M (2022) Delineation of Iron alteration zones

using spectrum-area fractal model and TOPSIS decision-making method in tarom metallogenic zone, NW Iran, Journal of Mining and Environment (JME) 13, 2: 503-525.
[35]. Kianoush, P, Mohammadi G, Hosseini SA, Keshavazr Faraj Khah N, Afzal P (2022) Compressional and shear interval velocity modeling to determine formation pressures in an oilfield of SW Iran, Journal of Mining and Environment (JME), 13, 3: 851-873.
[36]. Farhadi S, Afzal P, Boveiri Konari M, Daneshvar Saein L, Sadeghi B (2022) Combination of machine learning algorithms with concentration-area fractal method for soil geochemical anomaly detection in sediment-hosted Irankuh Pb-Zn deposit, Central Iran, Minerals 12, 6: 689.
[37]. Soltani F, Afzal P, Asghari O (2014) Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration–volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran, Journal of Geochemical Exploration, 140: 64–76, doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.007.
[38]. Carranza E J M (2011) Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. J Geochem Explor 110, 2:167–185, doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007.
[39]. Morgan P (1999) Azadegan Field Geophysical Interpretation Part 1, ConocoPhillips UK LTD, August 1999, Technical Report.
[40]. Mohammadi M, Farhani M (2011) Evaluation report of the Jurassic horizon of the well Azadegan-10, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, General Directorate of Petroleum Engineering, 71.
[41]. Du Y, Chen J, Cui Y, Xin J, Wang J, Zhen Li Y, Fu X (2016) Genetic mechanism and development of the unsteady Sarvak play of the Azadegan oil field, southwest of Iran. Petroleum Science, 13: 34–51.
[42]. Hendi S S (2002) Estimation of shear wave velocity from petrophysical logs and correlation with lab measurments in the Azadegan wells No (1 to 4), NIOC-RIPI, Geophysics Research Department, 4: 18-31.
[43]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2022) Application of pressure-volume (P-V) fractal models in modeling formation pressure and drilling fluid determination in an oilfield of SW Iran, Journal of Petroleum Science and Technology (JPST), 12, 1: 2-20, doi.org/10.22078/jpst.2022.4845.1809.
[44]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Inversion of seismic data to modeling the Interval Velocity in an Oilfield of SW Iran. Results in Geophysical Sciences, 13, 100051, doi.org/10.1016/j.ringps.2023.100051.
[45]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Determining the drilling mud window by integration of geostatistics, intelligent, and conditional programming models in an oilfield of SW Iran, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 13: 5.
[46]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) ANN-based estimation of pore pressure of hydrocarbon reservoirs—a case study, Arabian Journal of Geosciences, 16: 302.
[47]. Talebi F, HajiZadeh F (2022) The effect of porosity on the seismic waves velocities and elastic coefficients in a South-Western Iran›s oil field. Journal of Petroleum Science and Technology (JPST), 12, 2: 34-41, doi: 10.22078/JPST.2023.1287.
[48]. Shakiba S, Doulati ardejani F (2023) Introducing a MATLAB Code as a Statistical Approach for Fracture Networks Modeling. Journal of Petroleum Science and Technology (JPST), Available Online from 14 February 2023, 10.22078/JPST.2023.4935.1838.
[49]. Golmohamadi E, Moradzade A, Abdollahipour A, Mohebian R, Bahramali Asadi Kelishami S (2022) Identification of Fractures in Kangan and Dalan Formations Using the Integration of FMI Log and Seismic Attributes. Journal of Petroleum Research, 32, 126: 57-71, doi: 10.22078/pr.2022.4806.3154.
[50]. Adabnezhad, P, Kadkhodaie A, Norouzi G, Rostami A (2018) Three-Dimensional Modeling of Geo mechanical Units Using Seismic Data in One of the Southern Iran Gas Fields. Journal of Petroleum Research, 28, 1: 85-96, doi: 10.22078/pr.2017.2364.2095.

راهنمای تهیه مقالات برای چاپ در مجله پژوهش نفت

مجله پژوهش نفت، مقالات علمی و پژوهشی در زمینه‌های مرتبط با صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را برای چاپ می‌پذیرد. از پژوهشگران و کارشناسان گرامی که مایل به ارسال مقالات خود هستند، خواهشمندیم به موارد ذیل توجه فرمایند:

مقاله را از طریق وب سایت مجله به آدرس journals.ripi.ir و یا وب سایت پژوهشگاه صنعت نفت به آدرس www.ripi.ir با ثبت نام در سامانه الکترونیکی مجله ارسال نمایید.

مسؤولیت کامل مطالب و منابع چاپ شده بر عهده نویسنده یا نویسندگان خواهد بود و نسخه نهایی مقاله پیش از چاپ به امضاء نویسنده یا نویسندگان می‌رسد. نویسنده یا نویسندگان متعهد خواهند شد که مقالات ارسالی در نشریه دیگری انتشار نیافته است. **(فرم تعهد با امضاء تمام نویسندگان ارسال گردد.)**

مقالات ارسالی عودت داده نمی‌شود.

آئین نگارش فارسی باید به طور کامل رعایت شود و از به‌کار بردن اصطلاحات خارجی که معادل دقیق و پذیرفته شده در زبان فارسی دارند، خودداری شود.

مقاله باید بر روی کاغذ سفید (A4) به صورت یک خط در میان (فاصله سطرها ۱/۲ سانتی متر) توسط نرم افزار Microsoft Word ویرایش ۲۰۰۷ یا ماقبل آن تایپ و حاشیه بالا و پایین ۲/۵ سانتی متر، حاشیه چپ و راست ۲/۵ سانتی متر، لبه بالا ۲/۵ سانتی متر و لبه پایین ۱/۲۷ سانتی متر تنظیم شود.

مقاله باید شامل بخش‌های زیر باشد:

۱. عنوان: باید تا حد امکان کوتاه و کاملاً گویای موضوع مقاله باشد.

نام نویسنده یا نویسندگان باید پس از عنوان مقاله ذکر شود. نویسنده طرف مکاتبات باید با علامت * در کنار نام خود مشخص گردد.

عنوان و آدرس نویسنده یا نویسندگان و پست الکترونیکی نویسنده طرف مکاتبات مشخص شود.

۲. چکیده: باید بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ کلمه و شامل هدف از تحقیق، روش کار، مهم‌ترین یافته‌ها و نتیجه‌گیری باشد.

۳. واژه‌های کلیدی: شامل ۳ الی ۶ واژه کلیدی که نکات اصلی در مقاله را معرفی می‌کند.

۴. مقدمه: مقدمه ضمن بیان هدف تحقیق، باید حاوی خلاصه‌ای از اهمیت موضوع، نتایج مطالعات و مشاهدات مرتبط با تحقیق مورد نظر که در گذشته انجام شده است، با ذکر منابع و ماخذهای لازم آن‌ها باشد.

۵. روش کار: در این بخش لازم است روش‌های آزمایشگاهی و مواد مصرفی و تجهیزات مورد استفاده به طور کامل معرفی شود. همچنین چگونگی و روش نمونه‌گیری با دقت بیان شود و آزمون‌های آماری مورد استفاده و مراحل استنتاج آماری به خوبی تشریح گردد.

۶. نتایج و بحث: در برگیرنده نتایج حاصل از تحقیق به صورت متن، جدول، نمودار و تصویر و بحث در خصوص علل پدیده‌ها و مقایسه با یافته‌های مرتبط است.

۷. نتیجه‌گیری: در این بخش یافته‌های حاصل از تحقیق به صورت مختصر و شفاف ارائه می‌گردد.

۸. تشکر و قدردانی: در صورت لزوم از همکاری سازمان‌ها می‌شود.

۹. علائم و نشانه‌ها: فهرست علائم و نشانه‌های مورد استفاده در مقاله به ترتیب حروف الفبا به همراه واحد و شرح آن‌ها ارائه می‌شوند.

۱۰. مراجع: کلیه مراجع مورد استفاده به ترتیب ارجاع آن‌ها در متن، در این بخش ارائه می‌گردند.

۱۱. عنوان، چکیده و واژه‌های کلیدی انگلیسی: این بخش باید در صفحه‌ای جداگانه ارائه شود. تطبیق عنوان و چکیده فارسی با انگلیسی باید مورد توجه قرار گیرد. کلیه نکات مندرج در بند ۱، در ترجمه انگلیسی آن نیز رعایت می‌شود.

لطفاً در تنظیم مقالات، نکات زیر را رعایت فرمایید:

عنوان اصلی مقاله با قلم BZar شماره ۲۴ ضخیم تایپ شود.

عناوین اصلی داخل مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۴ ضخیم و عناوین فرعی با قلم BNazanin شماره ۱۲ ضخیم تایپ شوند.

هر تیتر از متن قبلی خود با یک خط فاصله جدا شود.

متن فارسی مقاله با قلم BNazanin شماره ۱۲/۵ نازک و واژه‌ها و متن انگلیسی با قلم Times New Roman شماره ۱۰ نازک تایپ شود.

عنوان جداول و شکل‌ها با قلم BNazanin شماره ۱۱ ضخیم تایپ گردد. عنوان جداول در بالا و عنوان شکل‌ها در پایین آن‌ها نوشته می‌شود.

محتوای فارسی جداول با قلم BNazanin شماره ۱۱ نازک و عبارات انگلیسی جداول با قلم Times New Roman شماره ۹ نازک تایپ شود.

کلیه اعداد باید به‌صورت فارسی تایپ شوند.
واحد تمامی اعداد باید در سیستم SI باشد.
کلیه فرمول‌ها باید به ترتیب شماره‌گذاری شده و با استفاده از نرم‌افزار MathType تهیه شوند.
کلیه جداول و شکل‌ها در انتهای مقاله ارائه گردد. هر جدول یا شکل در یک صفحه جداگانه ارائه شود. همچنین فایل اصلی مقاله شامل متن اصلی، چکیده فارسی و لاتین، جداول و تصاویر (بدون نام نویسندگان) نیز ارسال گردد.
کلیه جداول فارسی و راست چین باشد.
کلیه شکل‌ها باید به‌صورت سیاه و سفید و کاملاً واضح ارائه شوند.
از تکرار داده‌ها به صورت چندگانه (جدول و نمودار و ...) خودداری فرمایید.
اگر شکل یا جدولی از مرجع دیگر اخذ شده باشد، شماره مرجع در انتهای عنوان شکل یا جدول درج و مشخصات آن به منابع اضافه شود.
شکل‌های مقالات به صورت فایل اصلی (در همان نرم‌افزاری که توسط آن تهیه شده‌اند مانند Excel و غیره) ارسال شود.
از به‌کار بردن واژه‌های انگلیسی در متن مقاله خودداری شود. معادل انگلیسی کلمات فارسی و نام نویسنده (گان) که برای نخستین بار در مقاله به‌کار می‌رود، به صورت زیرنویس در صفحه مربوط درج گردد. زیرنویس‌ها در هر صفحه با گذاردن شماره فارسی در گوشه بالای آخرین حرف از کلمه، در متن مشخص شوند.
در بخش چکیده نباید ارجاعی به معادلات و یا مراجع مقاله داده شود.
کلیه مراجع ذکر شده در بخش مراجع باید در متن مقاله مورد ارجاع قرار گرفته باشند. شماره‌گذاری مراجع در متن در داخل کروشه صورت می‌گیرد.
-تعداد صفحات مقاله به صورت خام (بدون قالب‌بندی) حداکثر ۱۵ صفحه تهیه گردد.

ارائه مراجع بر اساس الگوی زیر صورت می‌گیرد:
-کتاب و گزارش فارسی و خارجی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) نام کتاب، ذکر نام فصل یا فصل‌های کتاب (درصورت مطالعه و استفاده از یک یا چند فصل کتاب)، نام کتاب، شماره ویرایش کتاب، ناشر، شماره صفحات.
مثال:

1. Barrow GM (1984) Physical chemistry, (4th ed.), McGraw-Hill Inc., 1-127.
2. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment, Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.
3. Spellman FR (2010) Problems facing water and wastewater treatment (Chapter 1), Spellman's standard handbook for wastewater operators, 1st ed., Crc Press, 9-32.

-مقاله فارسی:
نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان مقاله، نام مجله به طور کامل، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:
۴. صفایی م.، قاسمی م. ر. و میرحبیبی ع. (۱۳۸۴) ساخت و بررسی ریز ساختاری پایه‌های کاتالیستی کلسیم آلومینات، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، ۲۴، ۲: صفحات ۱۸ - ۹.
۵. زینل‌زاده ا.، رضایی م. ر. و کمالی م ر (۱۳۹۲) استفاده از مدلسازی یک بعدی حوضه در مطالعه سیستم نفتی: مثالی از سنگ‌های منشا کژدمی و پابده در جنوب فروافتادگی دزفول، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۲۹: ۱۱۹-۱۰۷.
- مقاله خارجی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال انتشار) عنوان مقاله، نام کامل مجله، دوره مجله، شماره مجله: شماره صفحات.
مثال‌ها:

6. Wang L, Sunden B (2003) Optimal design of plate heat exchangers with and without pressure drop specifications, Applied Thermal Engineering, 23: 295-311.
7. Qiu Z, Zou C (2020) Controlling factors on the formation and distribution of "sweet-spot areas" of marine gas shales in South China and a preliminary discussion on unconventional petroleum sedimentology, Journal of Asian Earth Sciences,

194, 1: 103989-103992.
8. Soltani B, Beiranvand B, Moussavi-Harami R, Honarmand J, Taati F (2020) Facies analysis and depositional setting of the upper pliocene akchagyl formation in southeastern caspian basin, NE Iran, Carbonates and Evaporites, 35, 8: 1-18.
9. Rögl F (1999) Mediterranean and Paratethys, Facts and hypothesis of an Oligocene to Miocene paleogeography (short review), Geologica Carpathica, 50, 4: 339-349.
10. Robert Alexandra MM, Letouzey J, Kavoosi MA, Sherkati S (2014) Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, Elsevier, 57: 68–87.

- مجموعه مقالات کنفرانس‌ها:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال برگزاری کنفرانس) عنوان مقاله، عنوان کنفرانس، محل برگزاری کنفرانس، شماره صفحات.

مثال:

۱۱. شکری قلعه س.، زرین پاشنه س. و سلطانیه م. (۱۳۷۹) مدل‌سازی و شبیه‌سازی راکتورهای چند فازی برای گوگردزدایی از سوخت دیزل، پنجمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، ایران.
12. Al-Thani J, Faisal F, Tony M (2005) Risk and uncertainty modeling in the oil and gas industry, Middle East Oil and Gas Show and Conference, Society of Petroleum Engineers (SPE), Bahrain.

- مقاله حاصل از کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(، عنوان مقاله، عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

13. Lee DH, Kim HI, Kim SS (2004) Surface modification of polymeric membranes by UV grafting, Advanced materials for membrane separations, American Chemical Society, 281-299.

- کتب:

نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان مقاله)سال انتشار(،عنوان کتاب، ناشر، شماره صفحات.

۱۴. آقانباتی ع. (۱۳۸۳) انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶-۱.

- پایان‌نامه: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده (سال) عنوان پایان‌نامه، نوع پایان‌نامه، دانشگاه، کشور، شماره صفحات (در صورت امکان).

مثال:

۱۵. ابراهیمی ه (۱۳۸۳) مدل‌سازی راکتورهای ریفرمینگ متان توسط بخار آب از نوع حرارت از بالا، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، ایران، ۷۱-۱.
۱۶. نبوی ج. (۱۳۸۳) گوگردزدایی بیولوژیکی زغال سنگ طبس، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران، ۴۸-۱۳.

-پایان‌نامه چاپ‌شده به زبان انگلیسی:

Author(s) (year) Title, Degree level, University/Institute, location, pp. .

17. Mack S. (2000) Desperate optimism, MA thesis, University of Calgary, Canada, 1-82.

- ثبت اختراع: نام خانوادگی حرف اول نام مخترع یا مخترعان (سال) عنوان اختراع، نوع و شماره ثبت اختراع.

مثال:

18. Baker F S (1998) Highly microporous carbon, U.S. Patent: 5710092.

.منابع اینترنتی: نام خانوادگی حرف اول نام نویسنده یا نویسندگان (سال) عنوان، آدرس سایت -

مثال:

19. Arps J, Lanning B, Dearnaley G (2007) Maximizing a potentially significant energy source, http://www.swri.org/3pubs/ttoday/spring06/energy.html.

توجه: در بخش مراجع (References) به هیچ وجه ممکن لغت یا عبارت غیره یا بقیه نویسندگان یا "et al" به‌هیچ وجه ذکر نگردد.

توجه: در بخش مراجع مقاله و بخش چکیده تفصیلی هر مقاله ، خواهشمند است که به تعدادی از مقالات چاپ شده در مجله پژوهش نفت اشاره گردد.

فونت تمامی مراجع که به زبان انگلیسی نگارش می گردد می‌بایست Times New Roman 10 Regular باشد.

در بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract) فونت ها باید به صورت ذیل باشند:

Font size and type	بخش چکیده تفصیلی (Extended Abstract)
Times New Roman 14 Regular and Bold	موضوع مقاله (Topic)
Times New Roman 10 Regular and Bold	نام و نام خانوادگی نویسندگان
Times New Roman 9 Regular and Italic	افیلیشن نویسندگان
Times New Roman 9 Regular	ایمیل نویسنده یا نویسندگان مسئول
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Abstract
Times New Roman 10 Regular	متن Abstract
Times New Roman 10 Italic and Bold	لغت Keywords
Times New Roman 10 Regular	لغات Keywords
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Introduction
Times New Roman 10 Regular	متن Introduction
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Geological settings (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular	متن Geological settings (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Materials and methods
Times New Roman 10 Regular	متن Materials and methods
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Results and discussion
Times New Roman 10 Regular	متن Results and discussion
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Conclusions
Times New Roman 10 Regular	متن Conclusions
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Acknowledgment (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular	متن Acknowledgment (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت Nomenclatures (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular	متن Nomenclatures (در صورت نیاز)
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت References
Times New Roman 10 Regular	متن References
Times New Roman 10 Regular and Bold	لغت (Appendixes)
Times New Roman 10 Regular	متن (Appendixes)
Research Article: Maximum 5 pages including figures and tables Review Article: Maximum 9 pages including figures and tables Short communication Article (Research note): Maximum 3 pages including figures and tables	تعداد صفحات (با در نظر گرفتن شکلها و جداول)
Times New Roman 9 Regular and Bold	لغت Table
Times New Roman 9 Regular	متن بیانکننده جدول
Times New Roman 9 Regular	لغات، عبارات، واحدها درون هر سلول از جداول
Times New Roman 9 Regular and Bold	لغت Fig.
Times New Roman 9 Regular	متن بیان کننده شکل
([Times New Roman 10 Regular (e.g. [1], [1,2-5], or [3,7	مراجع درون متن (in-text citations)

Petroleum Research, 2023(April -May), Vol. 33, No. 128

Application of Geostatistical and Velocity-Volume Fractal Models to Determine Interval Velocity and Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran

Pooria Kianoush[1], Peyman Afzal[1], Ghodratollah Mohammadi*[1], Nasser Keshavarz Faraj Khah[2] and Seyed Aliakbar Hosseini[3]

1. Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran
2. Geophysics Group, Geoscience Faculty, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Tehran, Iran
3. Department of Petroleum, Materials and Mining Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

gh_mohammadi@azad.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4787.3146

Received: April/21/2022 Accepted: September/19/2022

Abstract

In seismic methods, the estimation of formation pressures is acquired by transforming the seismic velocity to the pore pressure and contrasting it with the velocity log and effective pressure obtained during the well-test program. This study is regarding the velocity studies in one of the oilfields in SW Iran, which is generally carbonated. Except for the Kazhdumi Formation, they do not have shale interbeds. This study is based on information from 23 wells and seismic interpretation. Compressional (Vp) and shear velocity (Vs) models are determined from combined geostatistical models and compared with the value-volume fractal method, especially the velocity-volume model. Based on vertical Seismic Profiling (VSP) data, the maximum Interval velocity is 2760-2900 m/s in the northeast of the field related to the Gotnia Formation. In order to determine the formation fracture pressure, the shear velocity cube is modeled using exploratory well-cores and dipole sonic imager (DSI) shear velocity logs. The final cube with a coefficient of 0.95 has been determined for the shear velocity data obtained from the porosity, lithology, and primary DSI shear velocity data. The final amounts of inverted acoustic impedance (AI) in the deeper formation of the field are mainly in the range of 8000-15000 [(m/s)*(gr/cm^3)], which it could be referred to as calcareous formations. Based on the calculation of the logratio matrix obtained from the Velocity-Volume (Vp-V) fractal model, the maximum overall accuracy (OA) in the dominant limestone intervals is 0.74. It indicates a high correlation of the compressional velocity cube model obtained from a combination of sequential Gaussian simulation (SGS) and co-kriging models with acoustic impedance inversion (AI). In the final Vp cube's vertical Variogram, the sill is 0.34, and in major and minor is 0.96. Anisotropy range for vertical variogram range is 96 meters and for major and minor directions is 11850 meters.

Keywords: Seismic Velocity Modeling, Compressional Velocity Cube, Acoustic Impedance Inversion, Formation Pressure, Velocity-Volume Fractal Model.

Effect of Cationic Chain Length Part of Ionic Liquid based on the Imidazolium on the Spreading Coefficient of Crude Oil on Dolomitic Rock Surface in the Presence of Sulfate and Chloride Ions

Mohammad Barari, Mostafa Lashkarbolooki* and Reza Abedini

Enhanced Oil Recovery (EOR) and Gas Processing Research Lab., Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

m.lashkarbolooki@nit.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2023.4680.3110

Received: January/05/2022 Accepted: January/01/2023

Abstract

Surfactant flooding is one of the most effective methods of the enhanced oil recovery (EOR) technique since it can reduce the interfacial tension (IFT) and wettability of the crude oil oil/rock/formation brine system. The aim of this study is to investigate the effect of ions (NaCl and Na_2SO_4) on the efficiency of two ionic liquids (ILs) namely 1-dodecyl-3-methyl imidazolium chloride ([C_{12}mim][C])) and 1-octadecyl-3-methyl imidazolium chloride ([C18mim][Cl]) with different alkyl chain lengths on the IFT reduction and wettability alteration using works of adhesion and cohesion and spreading coefficient. Based on the critical micelle concentration (CMC) measurement, the efficiency of ILs at three different concentrations (C), C<CMC, C=CMC, and C=CMC, are investigated to evaluate the wettability alteration on the dolomitic carbonate rock surface and oil spreading coefficient. The results show that the performance of IL with longer chain length depends on the salt type, although the importance of surfactant concentration is dominant compared with salt type effect. To sum up, it seems that the IFT reduction can improve the performance of the solution for wettability alteration. The worth mentioning point is that the highest spreading coefficient is obtained for the IL with shorter chain length ([C_{12}mim] [Cl]) in the presence of NaCl salt.

Keywords: Ionic Liquids, Surfactant, Salinity, Spreading Coefficient, Interfacial Tension, Wettability Alteration.

Petroleum Research, 2023(April -May), Vol. 33, No. 128

Microfacies, Sedimentary Environments and Diagenesis of the Dariyan Formation in Southeast of the Persian Gulf

Minasadat Hashemi[1], Davood Jahani*[1], Seyed Mohsen Aleali[1], Ali Kadkhodaie[2] and Bita Arbab[3]
1. Candidate of Sedimentology, Department of Earth Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran
3. Department of Petrophysics, Iranian Offshore Oil Company, Tehran, Iran
jahani_davood@yahoo.com
DOI:10.22078/PR.2022.4943.3204

Received: October/10/2022 Accepted: December/17/2022

Abstract

Dariyan Formation (with Aptian age) is considered as one of the important oil reservoir of the Zagros and Persian Gulf sedimentary Basin. This formation in the studied field in southeast of the Persian Gulf, is considered as the most important oil reservoir rock. In this study, microscopic thinsections that prepared from the cores of the Dariyan Formation, were investigated. The study of the microfacies of the Dariyan Formation in this field led to identification of seven carbonate microfacies and one mixed carbonate-clastic microfacies, which were deposited in four facies belt including the inner ramp, middle ramp, outer ramp and deep basin. The investigating of the fauna in the studied microfacies shows a relatively shallow marine environment (in some intervals representing the deep marine environment), generally. Uniform facies changes and the absence of rudists and corals which are reef-building faunas as well as the replacement of Lithocodium algae with less ability to form the large reefs, represent the homoclinal carbonate ramp environment, which contain «patch reefs». Importanat diagenesis processes such as: cementation, bioturbation, pyritization, phosphatization, dolomitization, dissolution, Mechanical and chemical compaction and fracture has affected the carbonate rocks of this Formation. Correspondence of porosity and permeability data of the cores indicates that the reservoir quality of the Dariyan Formation in the studied field was affected by facies, sedimentary environment and diagenesis factors, so the lithocodium- bearing facies (boundstone-flootstone) have the most porous facies.

Keywords: Microfacies, Diagenesis, Carbonate Ramp, Dariyan Formation, Persian Gulf.

The Application of Metaheuristic Optimization Algorithms of Gravitational Search, Particle Swarm, and their Hybrid in Fracture Network Modeling

Sima Shakiba[1,2] and Faramarz Doulati Ardejani[1,2]*

1. School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Iran

2. Mine Environment and Hydrogeology Research Laboratory (MEHR Lab), University of Tehran, Iran

fdoulati@ut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4960.3210

Received: October/24/2022 Accepted: December/27/2022

Abstract

Fractured network modeling is the main prerequisite for fluid flow simulation in many applications such as groundwater resource management, oil and gas reservoir simulation, geothermal energy resource modeling and etc. The aim of this study is to develop an iterative object-based algorithm for fractured network modeling that considers both statistical parameters and spatial connectivity of fractures. The presented algorithm uses the functions of fracture neighborhood matrices in image processing to make clear the fracture continuity and to determine their spatial distribution using the matrix of interconnected fracture cell detection, Sobel matrix, Prewitt matrix and Laplacian matrix. The objective function defines the differences between the features of the reference fracture network and the stochastic generated fracture network using a norm of two. To solve this objective function, optimization algorithms of Gravitational search, particle swarm and hybrid of these two metaheuristic algorithms have been used. In this paper, the metaheuristic algorithm of particle swarm optimization enjoys more validity in fracture network modelling. Therefore, among the metaheuristic algorithms, PSO algorithm regenerates the reference fracture network with the accuracy of 98.89%.

Keywords: Fractured Network Modeling, Multivariate Optimization Algorithms, Particle Swarm Optimization, Gravitational Search Algorithm.

Petroleum Research, 2023(April -May), Vol. 33, No. 128

Comparison and Design of Optimal Mesh Size in Computational Fluid Dynamics Model of Well Cleaning

Mohammad Bagher Homayoun[1]*, Mohsen Dehvedar[1] and Amir Hossein Ashhar[2]
1. Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
2. Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
mb.homayoun@aut.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4788.3148

Received: April/25/2022 Accepted: November/10/2022

Abstract

The first and most important task of drilling fluid is to help clean the borehole and transport drilling cuttings to the surface. In addition, approximately twenty-five percent of unwanted waiting time on drilling rigs is due to time spent on well cleaning. With the acquisition of powerful computer systems, the processes of simulating well-cleaning operations and preparing models of operational wells are expanding, and this practice, while increasing accuracy and productivity for implementation in operational fields, avoids spending a lot of time and money. In the present research, an attempt has been made to design and validate a model based on experimental tests conducted in the flow loop of the drilling laboratory by using computational fluid dynamics, and by examining the current model with a number of similar CFD models and laboratory results, the optimal mesh and its effect on increasing the accuracy of the results have been studied as well as the efficiency and speed of the simulation. Also, by comparing the new experimental model and the previous experimental model, physical improvements for simulating the wellbore environment, such as adding a nozzle and bit and replacing the flow output is observed, and a CFD model designed based on the old experimental model and this optimized CFD model designed based on the new experimental model has also been compared. and by checking the accuracy and execution time of each one, the optimal mesh is selected.

Keywords: Cutting Transport, Borehole Cleaning, Two-phase Fluid Mechanics, Computational Fluid Dynamics, Mesh Independancy.

Determination of Reservoir Parameters of the Upper Part of Dalan Formation Using NMR Log and Core in South Pars Oil Field

Mohammad Barati Diz[1], Ali Kadkhodaie[2], Bahman Soleimani[1]*, Fatemeh Saberi[3] and Pourya Asoude[3]
1. Department of Petroleum Geology and Sedimentary Basin, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
2. Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Iran
3. Department of sedimentary Basins and petroleum, Faculty of Earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
soleimani_b@scu.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4546.3052

Received: July/13/2021 Accepted: April/09/2022

Abstract

Determining reservoir parameters is very important which is usually conducted in laboratories, but, it is an expensive, time consuming and difficult process.Therefore, in this study, NMR log has been used to determine porosity, permeability, capillary pressure in the upper part of Dalan Formation in well SP-A of South Pars gas field. In this method, the capillary pressure versus Sw was plotted from the T2 distribution of NMR log and then compared with the curves obtained from mercury injection in the studied well. High Correlation coefficient of 0.93 and 0.98 are obtained by comparing core derived versus NMR porosity and Timur permeability (mean NMR Timur permeability 80 md) for the reservoir zone (k4). According to well log and software evaluation mean total porosity is 15.5% and mean effective porosity is 11.9 % for the study area. Low shale volume, adequate porosity showed that talent the reservoir of the study area is high.

Keywords: Keywords: Reservoir Parameters; NMR Log; Dalan Formation; South Pars Oil Field, Petro Physic.

Petroleum Research, 2023(April -May), Vol. 33, No. 128

Improving the Performance of a Solar Still Using a Flat Plate Collector

Seyed Mohammad Sadegh Mousavi Shad[1], Mohammad Mazidi Sharfabadi[2]*, Ashkan Abdalisousan[1,3]

1. Department of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
2. Development and Optimization of Energy Technologies Division, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran
3. Department of Engineering and Technology, Islamic Azad University, Astara Branch, Astara, Iran

mazidim@ripi.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4955.3208

Received: October/22/2022 Accepted: December/17/2022

Abstract

In this article, the combination of a flat plate solar collector with a solar still is used for water desalination. The purpose of this study is to increase the output of the solar still by improving its performance by using a whole flat plate and investigating the effect of solar water on the amount of distilled water produced. Various effects, environment, water depth, environment, speed, and solar radiation have been studied to increase productivity. The results showed that coupling solar still with a solar collector increases the efficiency by 48%. Also, the amount of water depth in the distillation device affects the production of distilled water, and it is clear that by decreasing the depth from 3 cm to 2 cm, the amount of freshwater produced increases by 8.5%. The results obtained from the tests showed that the volume of distilled water output from the device, for an average depth of 2 cm to 4 cm, is 4.6 to 9.5 L/day using the collector and 2.4 to 1.3 L/day. It is without using it. The average radiation intensity and wind speed during the test with the collector were 1035 W/m^2 and 3.7 m/s, respectively, and in the test without the collector, it was 980 W/m^2 and 4.2 m/s.

Keywords: Desalination, Flat Plate Collector, Solar Still, Distilled Water.

Different Qualities of Cement Banding in Geological Formations of Khangiran Gas Field, NE Iran

Hamed Ghorbanpour[1]*, Amir Naqibi[2], Mehdi Alaviyan[3] and Abouzar Bahari[4]

1. Petroleum Engineering Department, East Oil and Gas Production Company (EOGPC), Mashhad, Iran
2. Petroleum Engineering Department, Iranian Central Oil Fields Company (ICOFC), Mashhad, Iran
3. Technical Management Department, East Oil and Gas Production Company (EOGPC), Mashhad, Iran
4. Petroleum Engineering Department, East Oil and Gas Production Company (EOGPC), Mashhad, Iran

ghorbanpour_geo@yahoo.com

DOI:10.22078/PR.2022.4901.3191

Received: August/27/2022 Accepted: December/23/2022

Abstract

In oil and gas wells, the quality of cementation behind the casing and liners has a significant role in maintaining safe production and reducing costs due to possible future repairs of the wells. Proper cementing prevents interlayer flows behind the casing, reduces the severity of corrosion of the outer surface of casing, prevents leakage of the annulus and the edge of liners, prevents water movement from deep to the upper reservoir zones of the space be-hind the pipes and prevents subsidence due to the infiltration of water from deep into the surface layers of the earth. The results of this study show that apart from the method of cementing operations and cement compositions, the property of rock and fluid also affects the quality of cementation. In drilled wells of Khangiran gas field, mainly the quality of cementation in certain zones of sedimentary formations is inappropriate. In this study, after applying petrophysical zoning on the formations of Khangiran field, first the sub-zones in which the quality of cementation is usually low were identified. Such as zone3 of Abderaz Formatiom. Then, the possible reasons for this event were investigated. For example, Existence of high permeability in zone1 of kalat formation. and finally, some suggested solutions to prevent the recurrence of this phenomenon in drilling future wells were presented. Such as changing the depth of casing point. The most important zones in which cementing are weak include porous and permeable zones and gas zones.

Keywords: Khangiran Field, Cementation-Casing, Zonation, Geological Formation.

Petroleum Research, 2023(April -May), Vol. 33, No. 128

Rock Typing Determination of the Dariyan Formation for Reservoir Evaluation in the Framework of Depositional Sequences in an Oilfield in the Eastern Persian Gulf

Mohammad Ali Salehi*[1], Javad Sobhani [2], Hamzeh Mehrabi[2] and Sajjad Kazem Shiroudi[3]
1. Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Iran
2. Sedimentology Group, School of Geology, College of Science University of Tehran, Iran
3. Iranian Offshore Oil Company (IOOC), Tehran, Iran
ma.salehi@sci.ui.ac.ir
DOI:10.22078/PR.2022.4892.3187

Received: August/17/2022 Accepted: October/31/2022

Abstract

The Dariyan Formation with the Aptian age is one of the most important prolific oil reservoirs in the Zagros and Persian Gulf. In the current study, different rock typing approaches were integrated and applied for the reservoir characterization of this formation in an oil field in the eastern Persian Gulf. Petrographic studies on the thin sections of the studied formation have led to the recognition of nine microfacies grouped into four sub-environments, including basin, outer, middle and inner ramp. The observed facies indicate a carbonate ramp as the depositional environment of the Dariyan Formation. The most important diagenetic processes observed in thin sections are dissolution, dolomitization, fracturing, micritization, (mechanical and chemical) compaction, and bioturbation. Based on the porosity-permeability of cores, six hydraulic flow units (the flow zone indicators = FZI method), four Winland rock types, and three Lucia rock classes were identified. Predicted porosity and permeability from log data were used to identify five hydraulic flow units (from the FZI method) and based on the stratigraphic modified Lorenz plot (SMLP), six reservoir/non-reservoir units were identified. In addition, using the multi-resolution graph-based clustering (MRGC) technique, seven electrofacies were determined. A comparison between the results of all rock-typing methods and petrographic data also reveals close correspondence. In a general view, the reservoir potential of the Dariyan Formation is higher in the Highstand System Tracts, which are mainly composed of grain-supported fossil-bearing and boundstone facies of the inner ramp sub-environment that could be a target zone for the field development. In contrast, the mud-dominated facies of the basin and outer ramp sub-environments in the Transgressive System Tracts are the poor reservoir units within the Dariyan Formation.

Keywords: Reservoir Rock Type, Hydraulic Flow Unit, Electrofacies, Dariyan Formation, Persian Gulf.

Proposing a Novel Approach to Design Horizontal Gas-liquid Separators

Mehdi Fadaei[1], Mohammad Javad Ameri[2]*, Yousef Rafiei[3] and Mohammd Reza Hossinzadeh

Faculty of Petroleum Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran

ameri@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4751.3131

Received: February/27/2022 Accepted: December/25/2022

Abstract

Surface separators play a very important role in oil and gas-producing fields. For this reason, their optimal design is very important for field applications. Semi-experimental design is a basic method to determine the dimensions of separators. Due to the simplifying assumptions used in semi-empirical design methods, they are only used for approximate estimation of the dimensions of the separators. The two-phase separator laboratory unit consists of a horizontal two-phase separator on a laboratory scale, pumps, compressors, and a static mixer to create a two-phase flow and a liquid filter to trap liquid droplets from the outlet gas flow. The separation efficiency is determined by weighing the trapped liquid droplets and by imaging the maximum diameter of the liquid droplets in the exhaust gas flow. In this research, the optimal dimensions of the separator are presented using a new combined method. In the proposed new combined method, CFD simulation of the two-phase separator was first carried out on a laboratory scale. Then the simulations were validated using laboratory data. Also, the optimal range for the slenderness ratio of the separator was determined. Finally, by using the new relationships presented in the form of dimensional analysis, the dimensions of the separator were determined, and then the performance of the designed two-phase separator was validated using the CFD simulation model. Validation results showed that the presented new method has a high capability in the design of gas-liquid separators. The relative error value between the results of the developed CFD model and the laboratory data was less than 7%. In order to use the presented new method in the field, the dimensions of the surface two-phase separator were determined for one of the production wells located in the South Pars gas field. One of the most important achievements of this research is providing the necessary platform for the optimal design and construction of surface separators for field use.

Keywords: Novel approach, Design, Horizontal, Gas-liquid, Separator.

PETROLEUM RESEARCH

2023 (April -May) • Volume 33 • No. 128

Contents:

PETROLEUM RESEARCH

2023(April -May)● Volume 33 ● No. 128



Address:
Research Institute of Petroleum Industry (RIPI)
P.O. Box: 14665-137, Tehran, Iran
Tel: (+98 21) 4825 2129, 4825 3263
Fax: (+98 21) 4473 9712
Website: www.ripi.ir